

Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



TRABAJO FINAL DE CARRERA

**Cromatografías Circulares de Pfeiffer: ¿Anecdótico test de campo
o análisis científico integral del suelo? Un abordaje desde la
Agroecología**

Alumno: Colagioia José Augusto

Legajo N°: 26164/8

DNI: 35.017.808

Correo electrónico: jaugustocolagioia@gmail.com

Director: Ing. Agr. Santiago Sarandón.

Co-Director: Ing. Agr. Daniel Adalberto Ferro

Tutora: Ing. Agr. Valeria Cataldi.

Modalidad: Una investigación bibliográfica referida a una temática de relevancia de un
área de las Ciencias Agrarias y Forestales

Fecha: 23/10/2020

Agradecimientos

A mi familia, que me apoyó siempre de forma incondicional y que me dio la posibilidad de ser el primer universitario luego de 4 generaciones de trabajadores del campo. A mis amistades, que me acompañaron en todo este proceso. A todas las personas que de una forma u otra me alentaron a terminar este trabajo, que tanto me costó. A Ramón Cieza y Griselda Sánchez Vallduví, profesores que me dieron consejos muy valiosos para esta última etapa tan difícil para mí. A Santiago Sarandón, que confió en mí y que siempre estuvo a disposición para ayudarme. A mi gran amigo y compañero de estudios Daniel Ferro, que con su corazón enorme y la bondad que lo caracteriza, me ayudó para que esta tesis se materialice. Por último, agradezco al pueblo argentino por tener una Universidad pública y gratuita, dentro de la cual está mi querida Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Esta casa de estudios me cambió, me abrió la cabeza, me hizo mejor persona y me permitió emprender un camino que hoy me resulta sumamente gratificante. Gracias a lo aprendido en esta facultad disfruto mi trabajo día a día, como un modo de vida, cumpliendo con un propósito importante para mí: trabajar para construir un mundo mejor.

Dedico este trabajo a todas las personas que viven para cuidar la tierra y para ayudar al prójimo.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	10
El paradigma agroalimentario dominante: contradicciones, externalidades y debilidades.	10
Un nuevo paradigma: la Agroecología	13
El suelo: un recurso fundamental para la vida humana y el planeta.	18
OBJETIVOS	20
Objetivo General	20
Objetivos Particulares	20
PARTE 1. EL SUELO Y LA NECESIDAD DE UN NUEVO ENFOQUE.	21
Preguntas sin responder sobre el suelo. Una deuda histórica.	21
El suelo: un sistema vivo.	22
Salud del suelo y servicios ecosistémicos	25
Evaluaciones de la salud de los suelos	27
El uso de indicadores ¿Una propuesta superadora?	28
Los servicios ecosistémicos y los indicadores de SS. La posibilidad de elaborar un Índice de Salud del Suelo integrador.....	28
Indicadores cualitativos como parte del conjunto de indicadores para la evaluación de la SS y participación de los diferentes actores como forma de promover estas propuestas.	49
Consideraciones finales	53
PARTE 2. ANÁLISIS DE LA SALUD DEL SUELO MEDIANTE LAS CROMATOGRAFÍAS CIRCULARES DE PFEIFFER (CCP).....	54
Origen y descripción de las CCP.....	54
Técnica de la CCP	56
Fundamento del método	58

¿Existe un respaldo científico para el método? Un repaso sobre la pertinencia del fundamento para cada etapa y para el método en general.	59
<i>Etapa 1: extracción o solubilización alcalina</i>	<i>59</i>
<i>Etapa 2: decantación por tiempo de reposo.....</i>	<i>62</i>
<i>Etapa 3: Reacción con nitrato de plata y revelado con luz.....</i>	<i>62</i>
<i>Análisis general del fundamento</i>	<i>66</i>
Criterios de base para la investigación en CCP.....	67
El valor de las zonas para el método	70
Algunos resultados de las investigaciones realizadas con base en las CCP	74
<i>Trabajos realizados en climas tropicales o sub-tropicales</i>	<i>74</i>
<i>Trabajos realizados en clima templado</i>	<i>78</i>
DISCUSIÓN.....	86
CONSIDERACIONES FINALES	94
BIBLIOGRAFÍA CITADA	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espiral de degradación de suelos por manejos inapropiados	30
Figura 2. Frecuencia de uso de los diferentes indicadores que se utilizaron para evaluar calidad o salud del suelo	32
Figura 3. Relación entre características, funciones y servicios ecosistémicos del suelo ...	41
Figura 4: Esquema de la propuesta de Manejo Adaptativo con foco en el suelo	52
Figura 5. Cromatografía Circular de Pfeiffer y sus zonas.....	56
Figura 6: Representación del proceso de impregnación del papel de filtro en una cromatografía de Pfeiffer	57
Figura 7. Cromatografía Circulares de Pfeiffer de un suelo indicando las diferentes zonas	67
Figura 8. Cromatografía Circulares de Pfeiffer de un suelo saludable indicando sus diferentes partes	69
Figura 9: Ejemplos de las zonas de las Cromatografía Circulares de Pfeiffer mostrando los patrones y coloraciones.....	69
Figura 10: Ejemplos de las zonas de las Cromatografía Circulares de Pfeiffer mostrando los patrones y coloraciones	70
Figura 11. Cromatografías Circulares de Pfeiffer realizadas con residuos de harina compostada	78
Figura 11: Principales objetivos, herramientas y abordajes de la evaluación de la calidad del suelo a lo largo de la historia	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de indicadores y funciones del suelo	34
Tabla 2: indicadores con potencial uso en el CASH.....	38

Tabla 3. Variables testeables, sus velocidades de variación, y los servicios ecosistémicos asociados que ayudan a mantener.....	43
Tabla 4: Peso asociado (valor entre 0 y 1) a los 29 indicadores seleccionados para evaluar las funciones del suelo consideradas para la formación del ISS.....	46
Tabla 5: Peso numérico asociado al grupo de de indicadores seleccionados para la evaluación del índice de salud del suelo	48
Tabla 6. Tablas de puntuación para evaluaciones cualitativas de CCP según sus características.....	71
Tabla 7. Diagnóstico de la Cromatografía Circular de Pfeiffer según zona y parámetro medido en la determinación.....	72
Tabla 8: Resumen de las características del cromatograma capaces de detectar cambios en las variables de salud del suelo de los diferentes usos del suelo	79
Tabla 9: Correlaciones entre los parámetros derivados de los diferentes patrones de las CCP	82
Tabla 10: Correlación (Valores R de Pearson) entre los patrones evaluados de las CCP y los análisis químicos tradicionales.....	83

RESUMEN

A partir de la creciente preocupación que existe en el mundo en relación a la degradación de los recursos naturales, la pérdida de servicios ecosistémicos y a los serios problemas que esto origina sobre el bienestar humano (hambre, pobreza, migraciones, problemas de salud, etc.) surge un nuevo paradigma. En las ciencias del suelo, la mirada cambia hacia los abordajes sistémicos con miradas más holísticas, se re-define al suelo como sistema vivo y se promueve un cambio estructural en las formas de evaluarlo.

En este trabajo se hace una revisión bibliográfica sobre estas nuevas concepciones del suelo, buscando generar en principio un resumen de las bases conceptuales de las propuestas emergentes dentro del marco de la Agroecología. En esta línea, también se profundiza en la investigación del método para la evaluación de salud del suelo de las Cromatografías Circulares de Pfeiffer a partir de la revisión de literatura existente sobre el método, buscando dilucidar tanto su pertinencia como método científico como sus alcances y limitaciones.

En las últimas dos décadas se ha desarrollado considerablemente una nueva base conceptual para el abordaje de los suelos como sistemas vivos. Ya no se define al suelo como sustrato y fuente de nutrientes para la producción de alimentos sino que se habla del suelo como una esfera o membrana, que integrado a la biosfera, la atmósfera y las demás esferas planetarias, contribuye en la generación permanente de servicios ecosistémicos como fijación de carbono, regulación hidrológica, ciclos biogeoquímicos, entre otros. Bajo este nuevo enfoque surge el concepto de salud del suelo para definir a un conjunto de condiciones básicas que sustentan a este sistema y que le permiten funcionar y sostenerse en el tiempo. La salud del suelo se puede definir como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de los procesos del ecosistema, como un sistema vivo. Para evaluarla se desarrollan así diferentes propuestas que buscan construir una serie de indicadores, lo más amplia posible, para lograr abarcar todos los aspectos, vinculados tanto al suelo como a quienes trabajan con él (agricultores y administradores de tierras). La elaboración de estos indicadores entonces, se ha puesto en el centro de atención de las propuestas emergentes para el cuidado del suelo, el ambiente y las personas en su conjunto.

El análisis histórico de los métodos tradicionales para la evaluación de los suelos muestra que en general, predominó un sesgo hacia lo químico y lo físico, con una orientación meramente productivista, sin considerar los servicios ecosistémicos que los suelos brindaban y los aspectos vinculados a la biología del suelo. En respuesta a esto, comienzan a desarrollarse en diferentes partes del mundo, alternativas para buscar analizar los suelos con una mirada más integral. Y a partir de esta necesidad, surgen las cromatografías circulares de Pfeiffer, como un método de evaluación de los suelos que arroja una “foto del suelo” brindando así la posibilidad de visualizar el estado general del mismo, integrando las diferentes fracciones en un único análisis (lo químico, lo físico y lo biológico). Lograría, de esta manera, expresar un resultado las propiedades emergentes del sistema suelo.

A pesar de ser un método que ya estaba desarrollado por su creador (Pfeiffer) en los años 60, demoró décadas en comenzar a estudiarse en instituciones de investigación. Hoy día la mayor parte de la experiencia en la técnica está fuera de los ámbitos científicos ya que ha sido practicada durante muchos años por agricultores y profesionales del campo.

En base a lo revisado en la bibliografía científica publicada sobre las cromatografías, se podría sostener que se presenta como una técnica que puede contribuir en la evaluación de la salud de los suelos, arrojando una valoración cualitativa. También se encontró un respaldo considerable para la metodología propuesta en la bibliografía, es decir, se pudo constatar que la técnica de las cromatografías circulares de Pfeiffer tiene un fundamento justificado.

Por otro lado, todavía es muy bajo el número de trabajos que están investigándolas, por lo que aún resta un proceso considerable de comprensión y estudio para lograr dilucidar sus alcances y limitaciones. Serán necesarias investigaciones que profundicen más sobre la consistencia de los resultados, los métodos de interpretación de las imágenes, el fundamento de la metodología, entre otros.

INTRODUCCIÓN

El paradigma agroalimentario dominante: contradicciones, externalidades y debilidades.

En la segunda parte del siglo 20 se generó la denominada revolución verde. Con ella se consiguió aumentar marcadamente el rendimiento de los cultivos agrícolas a partir del uso de nuevas variedades, fertilizantes sintéticos y plaguicidas. El crecimiento de la producción de alimentos a escala mundial permitió alimentar a una parte importante de la población; en términos históricos, es la primera vez que el *Homo sapiens* se encuentra frente a este nivel de producción de alimentos a escala planetaria (Gliessman, 2014).

Sin embargo, el aumento de la producción de alimentos no fue suficiente para eliminar el hambre del mundo, lo cual podría explicarse al considerar que las causas del hambre no radican en la cantidad de alimento producidos, sino en la distribución (disponibilidad) y sobre todo, en el acceso a los mismos (De Schutter, 2011). Según este autor (quién fue relator especial por el derecho a la alimentación de la FAO), el hambre y la desnutrición quedarían fuertemente determinadas por el nivel de ingresos de las personas, el cuál viabiliza el acceso a los alimentos. Esto pone en evidencia según De Schutter (2011) que el sistema económico es en efecto lo que está excluyendo a un importante número de personas de su derecho a la alimentación. El hambre hoy día, tiene sus raíces en la pobreza y no en los niveles de producción.

Ya desde el final de la segunda guerra mundial se difundió globalmente el modelo de agricultura industrial. Con los insumos químicos como base para la producción, se sostenía que los nutrientes los aportarían los fertilizantes, los herbicidas controlarían las malezas, mientras que los pesticidas acabarían con las plagas y las enfermedades. Las monoculturas de cultivos de alta productividad se tornaron la norma, y la simplificación de los agroecosistemas condujo a un modelo de dependencia de insumos. Este tipo de agricultura ignoró por completo las disciplinas holísticas de la ecología y así se separó el medio ambiente del campo agrícola. Conservación de la naturaleza y producción eran

mutuamente excluyentes (Sturz & Christie, 2003). Las personas del área de ecología debían dedicarse a cuidar la biodiversidad en las reservas o parques y los profesionales de la agronomía debían cultivar los campos. Esto se sustentaba en la idea de que la tecnología era capaz resolver todos los problemas de los sistemas de producción. Sin embargo, los resultados indicaron lo contrario: aparecieron resistencias a herbicidas, las plagas y enfermedades se tornaron cada vez más difíciles de controlar con los químicos y creció la necesidad del uso de mayores dosis y nuevos productos. De esta manera, la agricultura, que logró aumentar la producción de alimentos, comenzó a ser duramente criticada por sus impactos negativos, tanto sobre el ambiente (contaminación y degradación) como sobre la salud de las personas y la calidad de los alimentos (Sturz & Christie, 2003).

Como subsistema del modelo económico dominante, el modelo de agricultura industrial - caracterizado por poseer grandes unidades productivas (escala), las tierras más fértiles, insumos subsidiados y un sistema de mercado configurado para su funcionamiento – tiene la capacidad de producir la cantidad de alimentos necesaria para alimentar a la población mundial. Sin embargo, este modelo es incapaz de ser sustentable en el tiempo, tanto desde la dimensión ecológica, como desde la social y económica. La concentración de las tierras, así como el dominio de las semillas y los mercados, afecta tanto a los medios de vida de 2,5 mil millones de pequeños campesinos en el mundo, como así también a la agrobiodiversidad y a la resiliencia de los agroecosistemas. Por lo tanto, desde una mirada global e integral, seguir intentando desarrollar el modelo de agricultura actual implicaría aumentar el hambre y la desigualdad a nivel planetario (Holt-Giménez & Altieri, 2013).

El modelo de agricultura dominante se encuentra frente a una contradicción fundamental: el cuerpo de técnicas, innovaciones, prácticas y políticas que se desarrollaron con “éxito” para aumentar la producción de alimentos, ha generado un marcado deterioro en todas las bases de la productividad - como la fertilidad del suelo, la capacidad de almacenar agua, el reciclaje de nutrientes, la diversidad genética, el clima (que se torna desfavorable) - así como otros servicios ecosistémicos claves para la vida humana. Es decir, la propuesta para alimentar al mundo significó la degradación de los recursos naturales de los cuales depende la agricultura para producir alimentos ¿Cómo se producirán alimentos en el futuro de esta manera? (Gliessman, 2014).

La Plataforma Intergubernamental de Ciencia y Política sobre Biodiversidad y Servicios de Ecosistemas (IPBES) publicó en 2018 un extenso informe titulado “Evaluación de degradación y restauración de tierras” en el cual se sostiene que es fundamental diagnosticar correctamente y atacar las causas del problema, no los síntomas (IPBES, 2018). Se expone que los procesos de degradación de tierras suceden de manera generalizada a escala planetaria. La pérdida de servicios ecosistémicos es una de las consecuencias de este proceso y ha alcanzado altos niveles en varias partes del mundo. Según este informe, los modelos de agricultura insustentables son uno de los principales responsables en la degradación de tierras y la pérdida de la biodiversidad asociada. La degradación generada por la actividad humana está impactando negativamente al menos a unas 3,2 mil millones de personas, afectando principalmente aquellas personas en situaciones de vulnerabilidad, de bajos recursos y/o que viven en zonas semiáridas o áridas. El IPBES (2018) expresa: “Combatir la degradación de la tierra y restaurar la tierra degradada es una prioridad urgente para proteger la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas vitales para toda la vida en la Tierra y para garantizar el bienestar humano”.

Este sistema, aplicado a escala planetaria, ha provocado un proceso de concentración de la propiedad del sistema alimentario en manos de unas pocas personas mientras los pequeños agricultores y trabajadores rurales han sido marginados progresivamente, condenados en muchos casos a la pobreza. Como parte de la paradoja, son justamente los pequeños agricultores los que podrían producir de manera sustentable, cuidando la salud de los sistemas vivos, administrando las tierras, generando alimentos para toda la población mundial y al mismo tiempo desarrollando condiciones de bienestar y calidad de vida para las poblaciones rurales (Holt-gimnez & Altieri, 2013; De Schutter, 2011; Gliessman, 2014; 2018).

El cambio climático, el aumento de costos de producción relacionados a tierra, agua, energía e insumos, así como la aparición de nuevas enfermedades agrícolas pone al sistema alimentario mundial en una situación de crisis, exponiendo así que resulta insostenible. Debido a esto y a la serie de factores que se fueron mencionando antes, un gran número de expertos en el mundo (científicos, analistas de políticas, economistas e investigadores de diversas ramas) sostienen que los métodos industriales en los cuales se basa el sistema alimentario mundial están causando un gran daño, tanto a las

personas como al planeta. Se propone un cambio de paradigma, un nuevo modelo de sistema alimentario (Gliessman, 2014).

Un nuevo paradigma: la Agroecología

Según el informe realizado para FAO por el grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición (GANESAN), sostiene que es necesaria una transformación profunda para poder afrontar los retos multidimensionales-complejos para alcanzar los objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030, logrando la seguridad alimentaria. Para lograr las transiciones hacia sistemas alimentarios sostenibles, se definen tres principios como 1) mejora de la eficiencia en el uso de los recursos, 2) fortalecer la resiliencia y 3) garantizar la equidad y la responsabilidad social. La base de esta propuesta parte del reconocimiento de los derechos humanos como condición para garantizar sistemas alimentarios verdaderamente sostenibles, considerando así los siete principios “PANTHER”: participación, rendición de cuentas, no discriminación, transparencia, dignidad humana, empoderamiento y Estado de derecho. (HLPE, 2019).

Cada vez hay más evidencia de que la resiliencia del sistema terrestre se está viendo debilitada por la actividad antrópica y es por ello que es urgente trazar algunos límites planetarios para poder desarrollar este nuevo paradigma. Se necesita un nuevo paradigma que pueda mantener la salud del sistema terrestre (entendiendo al planeta como un gran sistema vivo) y, a su vez, el desarrollo de las sociedades humanas para alcanzar la resiliencia (Steffen et al; 2015). Uno de los desafíos más acuciantes de nuestro tiempo es crear y cuidar comunidades humanas sostenibles, esto es según Capra (2014): *“comunidades diseñadas de tal manera que sus modos de vida, negocios, economía, estructuras físicas y tecnológicas no interfieren con la capacidad inherente de la naturaleza de sostener la vida”*.

Desde hace algunos años, viene emergiendo, tanto en ámbitos académicos como en otros sectores, una nueva visión, un abordaje sistémico integral que propone una visión holística del mundo. Uno de los referentes del tema es Fritjof Capra y a continuación se presenta una síntesis de su propuesta para el abordaje holístico:

Según Capra (2014) la lógica de la separación sujeto-objeto (dualismo cartesiano), la reducción de todo lo real a lo meramente físico (reduccionismo) y el enfoque sesgado hacia las partes sin considerar el todo (método analítico) ya no es capaz de explicar el mundo sin caer en contradicciones, sesgos o abstracciones. Sus limitaciones son cada vez más evidentes en una realidad que se muestra cada vez más compleja a partir de los nuevos conocimientos.

La visión holística del mundo, a pesar de haber estado siempre presente en algunas visiones orientales (como por ejemplo en la antigua América con ciertas cosmovisiones indígenas) y de ser reconocida como el paradigma emergente en el mundo occidental, es aún hoy minoritaria. Esta visión según Capra se basa en una nueva forma de conciencia plena, despierta, viva, que busca acceder a aquello que emerge en cada momento, captando su sentido. Desde lo metodológico, es un abordaje para una aproximación a la realidad que se enfoca con mayor preponderancia en la organización de sistemas vivos (y no las partes de la máquina), en los procesos y los patrones de organización (y no en la materia y la estructura), en las redes y las relaciones (y no en los objetos).

Capra plantea que el conocimiento de una realidad debe basarse en la visión de sistemas dinámicos y complejos, donde lo que se observa es, en efecto, producto de la evolución y las relaciones, donde se reconoce un cambio permanente y donde las propiedades no pueden ser explicadas a partir de las partes, sino que deben ser vistas como características emergentes a partir de las interacciones entre las mismas. El autor plantea: *“Desde la nueva perspectiva sistémica, un sistema vivo es un todo integrado cuyas propiedades esenciales no pueden reducirse a las de sus partes, sino que emergen de las interacciones que se dan entre ellas”* (Capra, 2014).

Entre los principales conceptos del nuevo paradigma sistémico y holístico que según Capra (1998) deberían reconsiderarse se pueden destacar:

- 🌈 Pasar de las partes al todo. Las propiedades de un sistema vivo emergen a partir de las interacciones de las partes que lo constituyen. Esto implica que el todo no puede ser explicado a partir de sus partes y que sus partes no pueden ser explicadas sin considerar el todo que las contiene. Es una relación de reciprocidad o también conocida como causalidad circular.

- ✚ Pasar de los objetos a las relaciones. Los objetos estarían definidos no por sus partes, sino por las relaciones entre ellas y por las interacciones con los demás objetos. Todo objeto sería un sistema formado por partes. Éstas, por su lado, son sistemas en sí mismos, mientras que a su vez, el objeto (el sistema) también es una parte o sub-sistema de otro sistema mayor. En definitiva, podría afirmarse que en realidad las partes no existen, sino que cada “todo” se encuentra formado por otras totalidades. *“No hay partes en absoluto, porque toda parte no es más que un patrón estable en una inseparable red de relaciones”*. El mundo sería así, una vasta red de relaciones en diferentes escalas, donde los objetos son apenas patrones de relaciones dinámicamente estables en un determinado tiempo y escala.
- ✚ Pasar de la cantidad a la calidad. Es necesario salir de la lógica de la cuantificación, a partir de las relaciones numéricas, como única forma de medir para definir objetos o características de los mismos. Al posicionarnos bajo el paradigma holístico, el foco se corre a las relaciones. Éstas, al expresarse, se pueden mostrar y evaluar cualitativamente. Sin embargo no son para nada fáciles de medir de forma cuantitativa. Las relaciones se repiten configurando un patrón y para poder explicar estos patrones de una red de relaciones los análisis cualitativos resultan más apropiados.
- ✚ Pasar de la estructura a los procesos. En la visión mecanicista se busca definir en primera instancia a la estructura que sustenta al objeto de estudio. En cambio, en la visión holística se buscan entender los procesos para luego poder definir el todo que los mismos conforman a partir de las relaciones. Según esta perspectiva, la estructura es en realidad, la manifestación visible de los procesos de interacción subyacentes. Se basaría en que la estructura no se sostiene por los elementos que la constituyen, sino por las interacciones entre los mismos. Esto no significa que no deba estudiarse la estructura sino que en definitiva, las estructuras se consolidan y se desarman en una dinámica continua.
- ✚ De los individuos a las comunidades. Continuando con la lógica de visualizar el patrón en red de relaciones, resulta evidente que para poder explicar el comportamiento individual debemos entender sus interacciones con todo los demás. Pasar del análisis sesgado en el individuo al análisis orientado a las relaciones implica pasar al nivel de comunidad, tanto desde una perspectiva social

(sistemas sociales) como ecológica (ecosistemas). Poner el foco en las comunidades vivas significa reconocer que ningún individuo ni grupo de individuos aislados pueden mantenerse por sí solos y que la diversidad, la interdependencia y la cooperación son cualidades imprescindibles para cualquier sistema vivo.

Uno de los conceptos que surgió en el seno de esta nueva visión es el de sustentabilidad. En el marco de los sistemas alimentarios, Sarandon et al. (2006) mencionan: *“Una agricultura sustentable es aquella que mantiene en el tiempo un flujo de bienes y servicios que satisfagan las necesidades alimenticias, socioeconómicas y culturales de la población, dentro de los límites biofísicos que establece el correcto funcionamiento de los sistemas naturales (agroecosistemas) que lo soportan”*.

Por tales motivos, se habla de nuevos modelos de desarrollo rural que se basen en la sustentabilidad, tanto ecológica como económica, social, política y cultural. La Agroecología que se presenta como una propuesta amplia, de naturaleza multidisciplinaria, puede contribuir en la construcción de formas de agricultura de base ecológica y en la elaboración de estrategias para el desarrollo rural basándose en una perspectiva multidimensional de largo plazo donde tanto el respeto de la diversidad sociocultural como de la biológica sean la base fundamental del cambio (Caporal et al., 2005).

En este sentido, la Agroecología, desde su concepción como ciencia, práctica y movimiento, propone la producción de alimentos y demás productos agrícolas con base en los principios ecológicos, diseñando agroecosistemas similares a los ecosistemas naturales, buscando imitar tanto su estructura como su dinámica y funcionamiento. El enfoque de sustentabilidad planteado por la Agroecología trasciende a lo meramente ecológico e incorpora otras dimensiones como la social, económica, política, cultural, ética, entre otras, donde son considerados todos los actores sociales (y sus relaciones), tanto individuales como colectivos. De esta manera, con una propuesta integral y holística, que parte de la salud del ecosistema como base fundamental para la vida humana, la Agroecología se posiciona como una poderosa herramienta de cambio que permitiría alcanzar sociedades más justas, igualitarias, que interactúen sinérgicamente con los ecosistemas naturales y los agroecosistemas, siendo resistentes, resilientes y sustentables (Gliessman, 2013).

Según la definición de FAO (2020): *“La Agroecología es una disciplina científica, un conjunto de prácticas y un movimiento social. Como ciencia, estudia cómo los diferentes componentes del agroecosistema interactúan. Como un conjunto de prácticas, busca sistemas agrícolas sostenibles que optimizan y estabilizan la producción. Como movimiento social, persigue papeles multifuncionales para la agricultura, promueve la justicia social, nutre la identidad y la cultura, y refuerza la viabilidad económica de las zonas rurales. Los agricultores familiares son las personas que tienen las herramientas para practicar la Agroecología. Ellos son los guardianes reales del conocimiento y la sabiduría necesaria para esta disciplina. Por lo tanto, los agricultores familiares de todo el mundo son los elementos claves para la producción de alimentos de manera agroecológica”*.

Mientras que según Gliessman (2018) *“La agroecología es la integración de la investigación, la educación, la acción y el cambio que trae sostenibilidad a todas las partes del sistema alimentario: ecológico, económico y social. Es transdisciplinaria porque valora todas las formas de conocimiento y experiencias en lo que respecta al cambio del sistema alimentario. Es participativa porque requiere la participación de todos los interesados, desde la granja hasta la mesa y todos los demás sujetos que estén en el medio. Y está orientada a la acción porque confronta las estructuras de poder económico y político del sistema alimentario industrial actual con estructuras sociales alternativas y acciones políticas. El enfoque se basa en el pensamiento ecológico donde se requiere una comprensión holística a nivel de sistemas de la sostenibilidad del sistema alimentario”*.

En su informe para Naciones Unidas, De Schutter (2011) sostiene: *“Toda la evidencia recopilada indica que la propagación de las prácticas agroecológicas puede aumentar al mismo tiempo la productividad agrícola y la seguridad alimentaria, mejorar los ingresos y los medios de sustento de la población rural, contener e invertir la tendencia a la pérdida de especies y la erosión genética. La agroecología es un modo de desarrollo agrícola que no sólo presenta fuertes conexiones conceptuales con el derecho a la alimentación sino que, además, ha demostrado que da resultados para avanzar rápidamente hacia la concreción de ese derecho humano para muchos grupos vulnerables en varios países y entornos”*

El suelo: un recurso fundamental para la vida humana y el planeta.

La perspectiva holística de la Agroecología habría posibilitado entonces nuevos análisis y miradas alternativas en relación a temas centrales de las ciencias naturales que han sido ampliamente estudiados, como sería por ejemplo el caso de los suelos.

Desde los inicios de las ciencias agropecuarias y afines, los suelos fueron foco de atención e investigaciones, pero no por su función ecosistémica o su valor intrínseco sino por su capacidad de producir alimentos (Labrador, 2008). En términos sociales, la preocupación por la degradación de los recursos naturales ha estado relacionada a la percepción de un daño sobre los recursos que brindan un servicio directo y visible, como por ejemplo, la contaminación del agua de bebida; los suelos aún hoy son vistos por una parte importante de la sociedad como recurso renovable e inagotable (Zinck, 2005). Las raíces de los motivos por los cuales las personas no valoran a algunos recursos naturales como el suelo quizás podría buscarse en la ruptura propia de la cultura occidental que separa a la naturaleza de la cultura-lo civilizado; y justamente, este es uno de los cambios en la visión indispensables para poder lograr una nueva conciencia del cuidado y el respeto de los recursos naturales (Feller, 2015). El importante descuido del suelo hoy día también se atribuye a un desconocimiento de su valor y sus funciones. Es muy difícil cuidar y preservar lo que no se conoce, por lo que resultará fundamental emprender desde diversos medios una alfabetización ecológica de suelos para la sociedad mundial (Falconí & Burbano, 2004).

Todos los medios de vida, el agua, la comida, la energía, así como la salud física y mental de las personas y las sociedades en su conjunto son producto, en parte o totalmente, de la naturaleza. Degradar los recursos implica afectar la calidad de vida de las personas, no sólo a partir de la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales sino también por la erosión cultural y la pérdida de saberes ancestrales que además de tener un elevado valor cultural, podrían servir para ayudar a revertir la degradación y el cambio climático (IPBES, 2018). Según esta plataforma, para alcanzar los objetivos propuestos para el Desarrollo Sustentable de la Agenda 2030 (Sustainable Development Goals) es necesario

y urgente comenzar a realizar acciones efectivas para promover la restauración de las tierras y evitar que continúe su degradación.

Se podría hablar de un capital natural, representado por el suelo, la biodiversidad, energía, agua, así como un capital sociocultural que permiten la producción de bienes y servicios. De esta manera, existiría una obligación ética de mantener en el tiempo la producción de estos bienes y servicios para que tanto la población actual como las generaciones futuras puedan satisfacer sus necesidades (Sarandon & Flores, 2014).

Bajo esta perspectiva, obtener rentabilidad a costa de la degradación de los recursos sería antiético en este nuevo paradigma de la Sustentabilidad (Sarandon et al., 2006).

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar una revisión bibliográfica acerca de la pertinencia de las Cromatografías Circulares de Pfeiffer como metodología para el análisis científico integral del suelo, abordado desde un punto de vista agroecológico.

Objetivos Particulares

- Realizar una breve síntesis de conceptos que describan al suelo como sistema vivo.
- Analizar los alcances y limitaciones que poseen las cromatografías para el análisis y diagnóstico de suelos desde un abordaje integral y holístico.

PARTE 1. EL SUELO Y LA NECESIDAD DE UN NUEVO ENFOQUE.

Preguntas sin responder sobre el suelo. Una deuda histórica.

La ciencia del suelo necesita dar respuestas y hacer sus aportes para ayudar a resolver algunos de los grandes problemas ambientales de la actualidad como son por ejemplo, la seguridad alimentaria, agua, biodiversidad y cambio climático. La degradación de los suelos por causas antrópicas ha afectado gravemente a la seguridad alimentaria de varias regiones, así como también ha comprometido el suministro de agua para muchas personas, tanto en cantidad como en calidad. A su vez, los manejos realizados han deteriorado los niveles de biodiversidad de los suelos, afectando los procesos ecosistémicos claves, mientras que la pérdida de materia orgánica debido a estas prácticas ha potenciado el calentamiento global, dado que los suelos se han comportado como fuentes de carbono, liberando dióxido de carbono a la atmósfera (Mol & Keesstra, 2012).

Los sistemas de producción basados en tecnologías de insumos y en la explotación de recursos no renovables sobrepasaron la capacidad de resiliencia de los suelos y de todos los procesos que mantienen su calidad/salud. Esto ha originado que en la literatura científica de los últimos años se comiencen a utilizar términos como “fatiga del suelo”, “degradación del suelo”, etc. A pesar del creciente interés, poco se sabe aún acerca de los procesos que generan la fertilidad del suelo, que mantienen su resiliencia, estabilidad y permiten la mejora de la productividad de los cultivos, más allá de las típicas prácticas de aplicación de fertilizantes químicos, rotaciones y manejos de residuos. Aún se tiene una comprensión muy superficial sobre las comunidades microbianas y casi no se aprecia su estructura, función, redundancia, así como las fuerzas organizadoras que las gobiernan (Sturz & Christie, 2003).

Paradójicamente, la dificultad de estudiar a un sistema tan complejo como el suelo se ve agravada por los métodos que segmentan y aíslan los componentes para su estudio (reduccionismo). Esta desconsideración del “todo” genera habitualmente el desarrollo de conceptos desarticulados, que no consiguen explicar el funcionamiento del sistema

completo. Los suelos deben ser considerado como una “totalidad”, mucho más que como la suma de sus partes (químicas, físicas, biológicas, etc.), porque son sistemas vivos altamente complejos donde interactúan plantas, hongos, bacterias, nematodos y una serie importante de componentes que lo sustentan. (Sturz & Christie, 2003).

Es necesario desarrollar un abordaje integral que permita evaluar los impactos de la degradación de los suelos desde un enfoque ecológico. A partir de las lecciones aprendidas en cada lugar (conocimiento local) se deberían proponer estrategias para regenerar las tierras degradadas, buscando aumentar la productividad y mejorando los medios de vida de las comunidades involucradas (Bindraban, 2012)

El suelo: un sistema vivo.

Las concepciones del suelo van cambiando en el transcurso del tiempo y en general, siempre están relacionadas a la percepción social de cada momento histórico. A pesar de los cambios que se fueron sucediendo, desde las concepciones más antiguas hasta las actuales, en la mirada de la agricultura industrial permanece la lógica utilitarista sobre el suelo. Se lo ve como un recurso al cual se lo valoriza por su uso, en donde siempre su mayor o menor valor está relacionado a la productividad agrícola. Y es que la ciencia del suelo tiene sus inicios en la agronomía. Del suelo, se estudió mayoritariamente todo lo que tuviera que ver con la producción (mineralogía, textura, nutrientes, materia orgánica) con un fuerte sesgo hacia la química y la física, omitiendo por negligencia, ya sea en parte o por completo, todo el componente biológico y las relaciones ecológicas del mismo (Bello et al. 2002; Labrador, 2008).

A pesar de que el suelo es el recurso natural más importante del planeta (Paul, 2016 & Young, 2004) la ciencia lo ha estudiado mayoritariamente enfocado en su química, las interacciones de su matriz y algunas transformaciones microbianas (Paul, 2016). Sabemos muy poco sobre el suelo y aún hoy, con todas las tecnologías existentes, sigue habiendo muchos misterios sobre el mismo (Young, 2004).

Hasta hace poco tiempo, las preguntas que se venían realizando sobre la dinámica y estructura del suelo podrían considerarse como rudimentarias, con una restricción grande

de la visión, orientadas a entender algunas expresiones de la heterogeneidad física del suelo sin relacionarlo con ninguna función específica (Young, 2004).

El hecho de haber sostenido este enfoque utilitarista y productivista sobre el suelo durante tantos años ha llevado a una situación preocupante en relación a los procesos de degradación tierras, como erosión, pérdida de materia orgánica, contaminación con químicos, salinización, disminución de biodiversidad, compactación, inundaciones, deslizamientos de tierras, entre otros (Labrador, 2008). A modo de ejemplo, mientras que antes la atención se centraba en cómo manejar la materia orgánica del suelo para impulsar los rendimientos agrícolas, hoy día, se debe considerar cómo este carbono tiene un impacto mucho más allá de la escala del agroecosistema (pasó a la atmosfera y está afectando el clima; se acumuló por erosión en el lecho de un río generando colmataciones en las áreas bajas y susceptibilidad a los déficits hídricos en las partes altas). En esta línea de pensamiento, es necesario empezar a ver al carbono, por ejemplo, como un indicador de la salud de los agroecosistemas y no sólo como un indicador de calidad de suelos asociado a la productividad. El hecho de comenzar a visualizar al suelo como un banco con potencial de almacenar carbono no deja de ser un objetivo limitado, pues un objetivo amplio sería que los manejos que mejoren la dinámica del carbono impliquen garantizar tanto la productividad como la salud de los agroecosistemas y de los ecosistemas adyacentes. Capturar carbono bajo esta perspectiva no significaría entonces mejorar sólo la productividad como en la antigua mirada sino aumentar la salud de un sistema mucho más amplio (Jensen, 2005).

El suelo es la interfase entre la litósfera (roca), la atmósfera (gases), el agua (hidrósfera) y los organismos vivos (biosfera); es una membrana que puede definirse como pedosfera y que cumple funciones esenciales como: sustento del crecimiento vegetal, control de los ciclos hidrológicos (tanto en la escala macro como en la micro), reciclado de las sustancias orgánicas, regulación de los gases atmosféricos y hábitat para una enorme diversidad de organismos (Brady & Weil, 2008).

Por otro lado, Vezzani (2011) define al suelo como un sistema vivo que funciona como uno de los principales reguladores de los ciclos de la biosfera. Su estructura y su funcionamiento son el resultado de complejas interacciones de los diferentes subsistemas que lo conforman como el mineral, el orgánico, vegetal, los organismos (micro, meso y

macro) y de su relación con el medio (clima) a lo largo de un determinado tiempo. Su funcionamiento se sustenta, al igual que todo ser vivo, en el pasaje continuo de energía y materia (principalmente desde las plantas) a través de su estructura. A partir de ese flujo se auto-organiza en diferentes estados de orden y complejidad. Estos estados se pueden visualizar por ejemplo con el estado de agregación del suelo, expresado en su estructura (Vezzani, 2011).

Por otra parte, Young (2004) sostiene que el suelo es el más complejo biomaterial del planeta y uno de los recursos naturales más fundamentales para los ecosistemas terrestres. Este estatus especial se debe a que es el sustento de una parte importante de las formas de vida de la Tierra.

El microbioma del sistema suelo se caracteriza por su auto-organización, es decir, por presentar una estructura y un funcionamiento que lo definen como un sistema vivo, autónomo. Entender el funcionamiento de este sistema implica entender cómo los ecosistemas complejos se vuelven capaces de auto-organizarse y mantener su funcionalidad. A su vez, ayudaría a diseñar agroecosistemas y generar manejos que permitan alcanzar la sustentabilidad (Young, 2004).

En un abordaje definido como “Modelo Holístico de la Edafósfera”, Bello et al., (2002) proponen por un lado considerar al suelo como un sistema vivo, estructurado bajo un determinado patrón de organización y funcionamiento, entendiendo a su vez que el suelo es un subsistema de los ecosistemas terrestres o, simplemente un subsistema del sistema terrestre global (considerando así al planeta como un sistema vivo auto-organizado). Al verlo como un sistema, se da por entendido que todas sus propiedades emergen a partir de su dinámica y funcionamiento, de una red de relaciones. Por el otro lado, se considera que el suelo se comporta también como una esfera, como una frontera de interacción con otras capas o “membranas” como podrían ser la atmósfera o la biósfera. La edafósfera podría ser vista como una biomembrana, con un funcionamiento similar al que tienen las membranas de los seres vivos, regulando los flujos de energía y materia, tanto a escala micro (del agroecosistema regulando la disponibilidad de nutrientes y agua para los cultivos por ejemplo) como macro (escala planetaria que regula la temperatura, el ciclo del agua, etc).

Salud del suelo y servicios ecosistémicos

Es importante describir detalladamente todas las funciones que cumple el suelo para poder explicitar la gran diversidad de servicios que provee a la sociedad. Serviría además para contribuir en la valorización del recurso, ya no sólo por su uso, sino por su importancia para el bienestar humano e incluso por su valor intrínseco. Ayudaría a desarrollar una nueva ética al respecto, basada la idea de que el suelo es un bien social o un patrimonio de la humanidad que debe ser cuidado y preservado (Burbano, 2016).

El suelo es proveedor de servicios ecosistémicos claves como la regulación de la atmósfera, del clima, producción de biomasa, descomposición y procesamiento de residuos, ciclaje y almacenaje de nutrientes, absorción y purificación de agua, controlador de erosión, de plagas y enfermedades, entre otros. Estos múltiples servicios se producen de forma simultánea a partir de complejas interacciones entre comunidades de la superficie y las subterráneas a lo largo de diferentes niveles de escala (Birgé et al., 2016).

En los últimos años se viene dando una preocupación creciente en relación al estado de los suelos, tanto en los sectores directamente vinculados a la actividad agrícola como a las partes involucradas indirectamente, sector público o la sociedad (Stott & Moebius-Clune, 2017). Por ejemplo, bajo el lema “Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables” la FAO celebró en el 2015 el año internacional de los suelos, dándole de esta manera un mensaje a la comunidad global sobre la importancia del cuidado de los mismos (FAO, 2015).

En las últimas décadas, se ha generado un gran cambio en la percepción sobre el suelo. La visión tradicional que lo consideraba como sustrato para la producción ha sido desplazada por un abordaje holístico, que considera al suelo como un sistema vivo y que reconoce sus múltiples interconexiones con los demás elementos del ambiente. El desarrollo del concepto de salud del suelo (SS) ha generado la posibilidad de empezar a trabajar en el manejo del mismo con el foco puesto en los procesos ecosistémicos globales (Hubanks et al., 2018).

La SS se puede definir como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de los procesos del ecosistema, como un sistema vivo, con la vitalidad suficiente para

sostener la productividad biológica, la calidad del agua, del aire, y promover la salud de las plantas, animales y seres humanos. (Doran, 1996; Doran & Zeiss, 2000; NRCS 2017).

De la definición se desprende la idea de la sustentabilidad, poniendo foco en que, mantener los suelos saludables significa cuidar un recurso fundamental para las generaciones futuras. Elegir la palabra salud implica darle una importancia sin precedentes a los organismos del suelo, porque la salud es inherente a los sistemas vivos. Y al mencionar la capacidad de funcionar, también focaliza en las condiciones básicas para el desarrollo de los organismos: alimentos, agua y refugio. Esta definición saca del centro a las propiedades (químicas o físicas por ejemplo) y revaloriza los procesos (NRCS, 2017).

El término “calidad de suelo” también es muy muy utilizado. En general, se han usado los dos términos como equivalentes, sin embargo, según Laishram et al., (2012) resulta importante distinguirlo; ya que mientras la calidad de suelos se relaciona específicamente a su funcionamiento, el concepto de salud del suelo posee mayor amplitud, debido a que lo presenta como un recurso finito, no renovable, que en su dinámica de interacción permanente con los demás elementos del ecosistema crean un ambiente saludable. Buneman et al. (2018) consideran que los términos calidad y salud del suelo son equivalentes en general, aunque dependerá en gran medida de cómo se define a cada uno, más que de las palabras en sí mismas.

En este trabajo se utilizará la palabra “salud” porque se considera que representa mejor los conceptos desarrollados para un abordaje holístico.

La definición dada de SS se puede considerar como un concepto integral, que abarca una visión amplia de los diversos factores que la determinan. Lo que permite deducir que, un suelo saludable, “vivo”, es fundamental para la seguridad alimentaria, ligando de esta manera la agricultura con la salud del ambiente y de la sociedad en su conjunto (Burbano, 2017).

La evaluación de la SS es un creciente campo de investigación que se enfoca en las funciones y complejidades del suelo, buscando cuantificar o determinar mediante indicadores el estado general de salud del suelo con el objetivo de poder diseñar sistemas de manejo que permitan alcanzar la sustentabilidad, tanto para los agroecosistemas como para los ecosistemas naturales.

Evaluaciones de la salud de los suelos

En este sentido, se sabe con claridad que los suelos saludables son la base tanto de la seguridad alimentaria como de la mitigación del cambio climático, pero aún permanece poco claro cómo medir con precisión la SS para poder proponer acciones concretas, ya sea en términos prácticos para los agroecosistemas, como en aspectos económicos o políticos (Hubanks et al., 2018).

Buneman et al. (2018), en su revisión bibliográfica sobre la calidad del suelo, coinciden con Romig et al. (1996), sugiriendo que probablemente, al margen de las diferentes definiciones de cada concepto, los investigadores se inclinan más por el uso de “calidad de suelo” mientras que los agricultores prefieren usar el concepto de “salud del suelo”.

El uso de la “salud” se ha introducido a las investigaciones científicas, debido a la evolución de la comprensión de las características del suelo y sobre todo de sus funciones. Ya no se lo considera como un medio para el crecimiento de las plantas o un sustrato; el suelo es entendido como un sistema vivo que provee servicios ecosistémicos esenciales.

Para poder definir la salud de un suelo se necesita el desarrollo de un “Índice Holístico” (“*Holistic Index*”) para obtener una evaluación confiable que permita medir los efectos de las prácticas de manejo y del uso de la tierra (Rinot et al., 2018). La SS no puede medirse directamente debido a su alta complejidad. Para evaluarla se debería usar diferentes indicadores, que analizados en conjunto pueden generar un diagnóstico determinado. Desarrollar estos indicadores permitiría elaborar estrategias para producir alimentos de forma sustentable (Arias et al., 2005).

Sparling et al., (2004) sugerían que, a pesar de que varios trabajos en la literatura científica proponían indicadores e índices de calidad de suelos para su evaluación, las metodologías propuestas no conseguían abordar de forma integral todos los aspectos involucrados, por lo que no se mostraban adecuadas aún para ser aplicadas en diversos suelos a escala global. Catorce años después, Hubanks et al., (2018) sostienen que al margen de que se tiene certeza de que la evaluación de la SS representa una gran

oportunidad para avanzar en la integración entre los estudios de suelo, la agricultura y el manejo de los ecosistemas, los investigadores aún se encuentran en un momento de debate metodológico: cómo medir la SS siendo que es el resultado de relaciones complejas entre diversos elementos, cómo integrar los resultados de las mediciones particulares para generar un valor o índice que represente la SS son algunas de las preguntas que aún no tienen respuestas claras.

El uso de indicadores ¿Una propuesta superadora?

La elaboración de indicadores ha sido importante para permitir medir e integrar información. Los indicadores de suelos son propiedades medibles del suelo, o de las plantas que proveen indicios sobre cómo puede funcionar en un determinado contexto. Pueden ser físicos, químicos o biológicos, referidos tanto a propiedades como a procesos o características particulares (por ejemplo podrían ser incluso características morfológicas o visuales de las plantas) (NRCS, 2017).

A la hora de definir indicadores es importante tener en consideración factores como: 1) relación funcional con los procesos ecosistémicos; 2) integración de las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos; 3) facilidad para medir e interpretar por la diversidad de los actores (que no sea exclusivo de investigadores, por ejemplo) y accesible; 4) sensible a las variaciones por el manejo y el clima; 5) que pueda pasar a formar parte de una base de datos, es decir que se pueda acoplar a un registro global (Doran & Parkin 1996).

Los servicios ecosistémicos y los indicadores de SS. La posibilidad de elaborar un Índice de Salud del Suelo integrador.

Según Rinot et al., (2018) para evaluar la SS se debe poder identificar los atributos más significativos y de carácter universal, así como también se debería cuantificar la contribución relativa de cada atributo a los servicios ecosistémicos (SES). El “Índice de

Salud del Suelo” (ISS) (*Soil Health Index*) debería reflejar la habilidad del suelo para proveer servicios ecosistémicos. El abordaje holístico de la SS es crucial para la sustentabilidad de los recursos.

Rinot et al., (2018), basándose en múltiples autores, proponen organizar los servicios ecosistémicos en tres categorías (regulación, provisión y soporte) y describen las funciones principales del suelo para cada servicio, así como las mediciones relevantes para cuantificarlas:

1) Regulación:

- Regulación del clima y de gases atmosféricos (mediciones relevantes como temperatura, emisión de gases, balance de energía de la superficie (“*surface energy balance*”).
- Regulación hídrica (con mediciones relevantes como escorrentía)
- Erosión y control de inundaciones (tasas de erosión)
- Regulación de plagas y enfermedades (con mediciones relevantes relativas a la biota del suelo y la estructura de la red trófica del mismo).
- Purificación de aguas (medido a través de la calidad del agua por ejemplo).

2) Provisión:

- Agua, energía y fibra (mediciones relativas a rendimiento y energía).
- Materias primas en general (peso, energía).
- Pool de genes (diversidad genética y funcional, secuenciación molecular, actividad enzimática).
- Agua dulce y almacenamiento de agua (contenido de agua, capacidad de campo).
- Meteorización y formación de suelo (Contenido mineral, propiedades físicas, contenido de materia orgánica).

3) Soporte:

- Ciclado de nutrientes (productividad primaria aérea neta, balance de nutrientes)
- Hábitat (productividad primaria aérea neta, biota del suelo y estructura de la red trófica del mismo).

Un suelo degradado es el resultado de un proceso en cascada en forma de espiral descendente donde gradualmente se van afectando los procesos que sostienen sus funcionamiento y la provisión de servicios ecosistémicos (Stott & Moebius-Clune, 2017). Esto puede observarse en la figura 1.

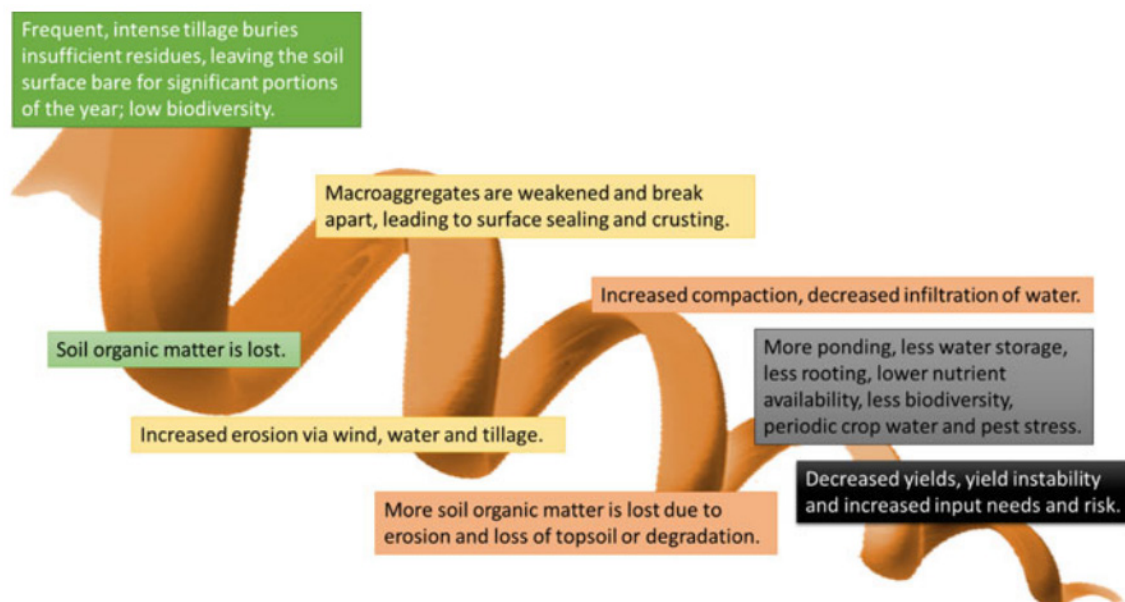


Figura 1. Espiral de degradación de suelos por manejos inapropiados según Stott & Moebius-Clune (2017), adaptado de Magdoff & Van Es (2009).

En la Figura 1 se ve como gradualmente se van perdiendo los SES por deterioro del funcionamiento del suelo. Algunos de los manejos inapropiados que generan estos efectos son las labranzas excesivas, la baja diversidad de cultivos, bajo nivel de cobertura y de raíces así como el uso elevado de insumos (herbicidas, fertilizantes, etc). La ruptura de los macroagregados del suelo, la pérdida de materia orgánica, la disminución de la actividad biológica, entre otros, provocan el colapso de las funciones mencionado que termina generando daños en múltiples niveles (ambientales, económicos, etc.).

La NRCS (2017) propone diferenciar las propiedades inherentes y dinámicas del suelo; mientras que las inherentes se refieren a aspectos del suelo que cambian muy poco o nada con el tiempo como puede ser la textura, tipos de arcilla, profundidades de los diferentes horizontes, etc.; las dinámicas son aquellas que pueden ser fuertemente

afectadas por el manejo, como por ejemplo los niveles de materia orgánica, la estructura del suelo, la actividad biológica, etc. Para evaluar el efecto de los manejos sobre la salud del suelo, se pone el foco en estas propiedades y se busca interpretar sus efectos sobre los procesos (NRCS, 2017).

Buneman et al., (2018) realizaron una revisión de trabajos (62 publicaciones) que han evaluado la calidad o salud del suelo en los últimos tiempos, y como resultado del mismo se observa un panorama general del enfoque que predominó en el ámbito científico históricamente, el químico.

Como bien representa la figura 2, los aspectos biológicos han sido desconsiderados largamente en los estudios sobre suelos y, justamente, todos los indicadores microbiológicos y bioquímicos como enzimas del suelo, respiración del suelo, micorrizas, perfil de lípidos, lombrices, entre otros, son los más sensibles a las variaciones de manejo. Estos indicadores consiguen mostrar pequeños cambios en periodos breves que los físicos y químicos en general no lo permiten (Raghavendra et al., 2020).

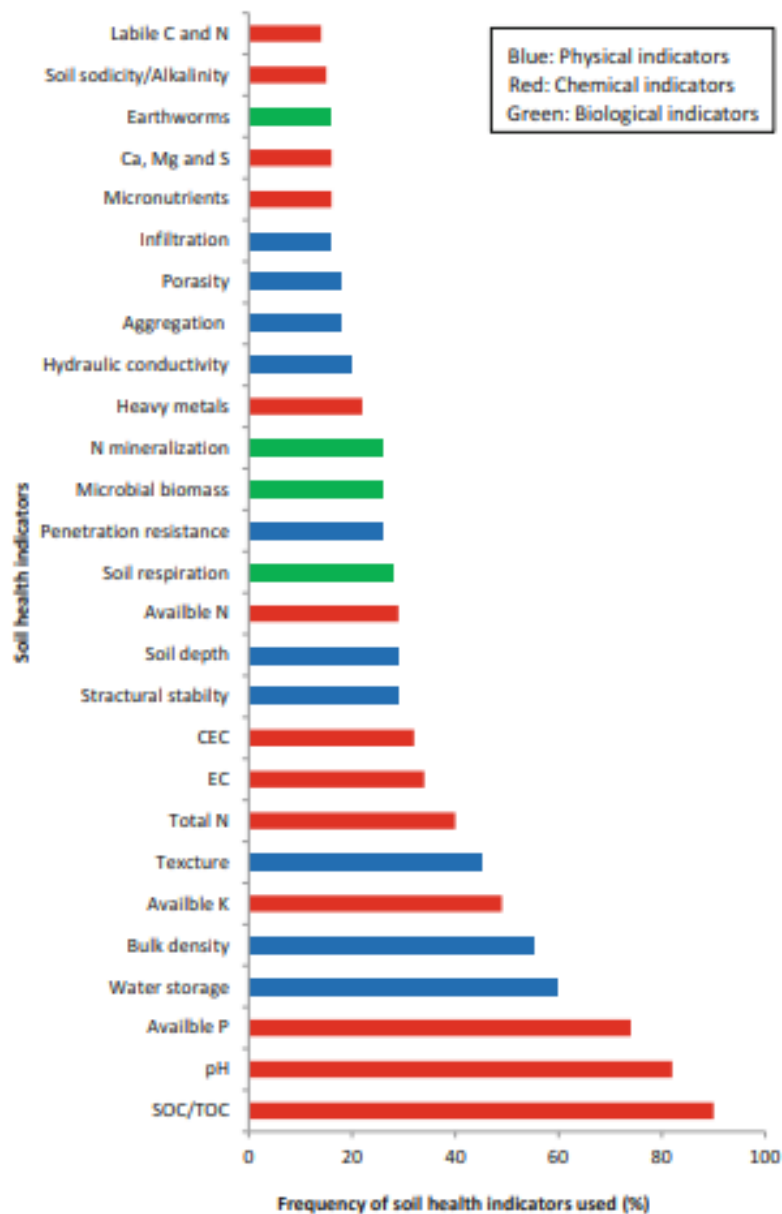


Figura 2. Frecuencia de uso de los diferentes indicadores que se utilizaron para evaluar calidad o salud del suelo. (Raghavendra et al., 2020 adaptado de Buneman et al., 2018).

En el eje vertical de la Figura 2 se observan los indicadores utilizados para evaluar calidad de suelos mientras que en el eje horizontal se encuentra la frecuencia de uso de los indicadores en los trabajos revisados. En rojo se presentan los indicadores químicos, en

azul los físicos y en verde los biológicos. Entre ellos se encuentran (desde abajo hacia arriba): carbono o materia orgánica total del suelo, pH, fósforo disponible, capacidad de almacenamiento de agua, densidad aparente, potasio disponible, textura, nitrógeno total, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, estabilidad estructura, profundidad del suelo, nitrógeno disponible, respiración del suelo, resistencia a la penetración, biomasa microbiana, mineralización de nitrógeno, metales pesados, conductividad hidráulica, agregación, porosidad, infiltración, micronutrientes, Calcio-Magnesio y Azufre, lombrices, sodicidad-alcalinidad, carbono y nitrógeno lábil. Se presentan los 27 indicadores con mayor frecuencia de aparición. En total se registraron 65 indicadores en el conjunto de los trabajos revisados por Buneman et al., (2018).

Como se observa en la Figura 2, dentro de los diez indicadores que se utilizan con mayor frecuencia, aparecen 7 químicos y 3 físicos, sin entrar en consideración los indicadores biológicos. De los 27 indicadores presentados hay sólo cuatro indicadores biológicos.

Con el objetivo de contribuir con el conocimiento sobre salud de suelos y buscando llegar hasta los agricultores de todo el país con la propuesta de mejorar el uso y la conservación de los mismos, el USDA de Estados Unidos creó la División de Salud del Suelo (SHD, *Soil Health Division*).

Realizando diagnósticos y diseñando sistemas con manejos basados en la salud del suelo se puede mejorar marcadamente tanto el potencial de producción de los agroecosistemas como así también la generación de servicios ecosistémicos esenciales. El manejo orientado a la SS permite mejorar la rentabilidad del sistema, porque mejora el ciclaje de nutrientes, la supresión de plagas, permite el ahorro de energía e insumos, mejora la eficiencia de la captura (infiltración), el almacenamiento y el uso del agua, entre otros. A su vez, estos manejos son claves y estratégicos para enfrentar los desafíos globales actuales como disponibilidad de agua en cantidad y calidad, hábitat para la biodiversidad, secuestro de carbono, producción de alimentos de forma sustentable para la creciente población mundial y generar un tejido socioeconómico rural que viabilice la vida en el campo y estimule la re-ruralización (Stott & Moebius Clune, 2017).

En el test de calidad del suelo propuesto por la SHD, se consideran los 3 grupos de indicadores tradicionales, químicos, físicos, biológicos y se les suma la materia orgánica como una cuarta pata, entendiendo que es un indicador integrador.

- Físicos (infiltración, densidad aparente, estructura del suelo y macroporos, profundidad del suelo, capacidad de almacenamiento de agua disponible): retención y transporte de agua y nutrientes, hábitat para organismos del suelo (micro-meso y macro), potencial de producción de los cultivos, porosidad, compactación, movimiento del agua, etc.
- Químicos (carbono reactivo, nitratos, pH, conductividad eléctrica, fósforo y potasio extractable, etc.): umbrales de actividad biológica y bioquímica, niveles de actividad de plantas y microorganismos, disponibilidad de nutrientes y potencial de pérdida de nitrógeno y/o fósforo.
- Biológicos (lombrices, biomasa de carbono y nitrógeno microbiana, materia orgánica particulada, nitrógeno potencialmente mineralizable, enzimas del suelo, respiración del suelo, carbono orgánico total): actividad catalítica microbiana y reposición/circulación de carbono y nitrógeno, productividad del suelo y oferta de nitrógeno a las plantas.
- Materia orgánica del suelo: estructura y estabilidad del suelo, fertilidad, retención de nutrientes.

Esta propuesta del SHD busca abordar el uso de los indicadores desde una concepción amplia, que los integre a los procesos del ecosistema. En la Tabla 1 se puede ver en forma sintetizada la matriz de indicadores respecto a las funciones del suelo.

Tabla 1. Matriz de indicadores y funciones del suelo.

Cuando existe una relación directa entre la función y el indicador, se muestra una mayor confiabilidad y facilidad de uso del método de evaluación asociado al indicador (los métodos de evaluación no se muestran en esta tabla) se indica con un mayor número de V. El I equivale a la mitad de V. (Adaptada de NRSC Soil Health división. Soil Quality Test, 2015)

	Funciones del suelo
--	---------------------

Indicadores	Sostienen la diversidad, la actividad y la productividad biológica.	Regulación y partición de agua y flujo de solutos	Filtro, buffer, descomposición y detoxificación de compuestos orgánicos e inorgánicos	Almacena y ciclaje de nutrientes y carbono	Estabilidad física y soporte para las plantas y humanos
Estabilidad de agregados	V V	V V	-	V V	V V I
Agua útil	V V V	V V I	-	V V	-
Densidad aparente	V V I	V V V	-	V	V V V
Lombrices	V V V	-	V V V	V V V	V V V
Infiltración	-	V V	V	-	-
Materia orgánica particulada	V V V	V V V	V V V	V V V	V V V
Nitrogeno potencialmente mineralizable	V V V	-	-	V V V	-
Carbono reactivo	V V	V	V V V	V V	V V
Dureza-Compactación	V	V V I	-	-	-
Costras superficiales	-	V V I	-	-	-

Conductividad eléctrica	-	V V V	-	-	-
Enzimas del suelo	V V V	-	-	V V V	-
Nitratos del suelo	V	V	-	-	-
pH del suelo	V V	V V V	V V V	V V V	-
Respiración del suelo	V V V	-	V	V V V	V V
Estructura del suelo y macroporos	V I	V I	V	V	V V
Carbono orgánico total	V V V	V V V	V V V	V V V	V V V

Según Raghavendra et al., (2020) la relación de interacción e integración entre los diferentes elementos que componen el suelo (aire, agua, minerales y materia orgánica) se puede describir a partir de los indicadores de salud del suelo, los cuales en su conjunto darían una idea sobre el funcionamiento de los procesos del suelo. Estos investigadores, basados en una serie de trabajos revisados de la bibliografía científica, destacaron algunos indicadores de SS por su importancia y su sensibilidad de respuesta a los manejos (este último factor es uno de los principales según los autores, ya que la sensibilidad ante los cambios es un atributo clave para un indicador de SS):

- Densidad aparente: se eligió debido a que es determinante de la capacidad de penetración de las raíces, está relacionado con la porosidad asociada a la circulación de aire y agua.
- Estabilidad de agregados: Se eligió debido a que es indicador de la estructura del suelo, de la resistencia a la erosión y responde tempranamente a los efectos del manejo.
- Infiltración y capacidad de almacenar agua útil: vinculado a los niveles de escurrimiento superficial, lixiviación y potencial de erosión.
- pH: influye en la disponibilidad de nutrientes, entre otros.

- Conductividad eléctrica: define el crecimiento vegetal, entre otros.
- Capacidad de intercambio catiónico: Indica la cantidad de cationes que el suelo puede retener. Es un indicador que integra lo físico-químico de los minerales con los biológicos como las sustancias coloidales orgánicas.
- Materia orgánica del suelo: determinante de la estructura del suelo y de su fertilidad.
- Estado de nutrientes del suelo: disponibilidad de nutrientes para los cultivos, tasas de inmovilización/mineralización, lixiviación, indicador de calidad ambiental.
- Sustancias contaminantes: indicadoras de riesgos para la salud humana, de los animales y de las plantas.
- Respiración del suelo: indicador de la actividad biológica, de la biomasa activa. Responde fácilmente a los cambios en el manejo que afectan a la materia orgánica del suelo.
- Enzimas (deshidrogenasa, Beta-glucosidasa, fosfatasa ácida y alcalina): procesos de óxido-reducción de carbono, de transferencia de electrones en cadena en células vivas, ciclaje de fósforo y nitrógeno orgánico, flujo de nutrientes, procesos de mineralización en general.
- Perfil de lípidos: diversidad y biomasa microbiana en el suelo.
- Micorrizas y Glomalina: agregación del suelo y movilización de nutrientes, entre otros.
- Trichoderma: descomposición de residuos, entre otros.
- Lombrices: relacionadas con la estructura del suelo, con el ciclaje de nutrientes, regulación del flujo de agua y aire.

Como se puede apreciar, estos investigadores deciden destacar 15 indicadores especialmente, de los cuales siete de ellos son biológicos. Su propuesta sobre la evaluación de la salud del suelo tiene una fuerte orientación hacia los aspectos biológicos debido a que consideran que son los indicadores más sensibles a los manejos. La sensibilidad del indicador se presenta como un factor clave en esta propuesta.

Por otro lado, la Universidad de Cornell desarrolló un sistema de evaluación de suelos para poder realizar diagnósticos sobre su estado de salud y poder diseñar propuestas de manejo que permitan alcanzar la sustentabilidad. El *Comprehensive Assessment of Soil Health* (CASH) busca integrar lo físico, lo químico y lo biológico en sus evaluaciones (Moebius-Clune et al., 2016). Los aspectos más relevantes de su propuesta son los siguientes puntos:

- Se miden los indicadores que representan procesos esenciales del ecosistema del suelo.
- Se realiza un sistema de puntuación y ponderación de las mediciones que permite su interpretación en un valor (índice) final.
- Permite vincular las limitaciones o los defectos identificados en el análisis con las prácticas de manejo.

De esta manera, se generan herramientas para que los agricultores puedan visualizar el efecto de las prácticas que realizan y buscar estrategias de manejo que le permitan alcanzar la sustentabilidad global.

“Se espera que una comprensión más integral del estado de salud del suelo pueda conducir a una mejor gestión, regenerativa y sostenible de los suelos a través de abordajes holísticos, adaptativos y basados en datos generados en cada lugar” (Moebius-Clunes et al., 2016)

En el CASH se seleccionaron inicialmente una serie de indicadores potenciales para la evaluación de la SS que se presentan en tabla 2.

Tabla 2: indicadores con potencial uso en el CASH (Moebius-Clune et al., 2016)

Indicadores Físicos	Indicadores Biológicos	Indicadores Químicos
---------------------	------------------------	----------------------

Textura	Presión de patógenos de raíz	Fósforo
Densidad aparente		Nitratos
Macro-porosidad	Población de nematodos benéficos	Potasio
Meso-porosidad		pH
Micro-porosidad	Población de nematodos parásitos	Magnesio
Agua útil		Calcio
Porosidad residual	Nitrógeno potencialmente mineralizable	Hierro
Resistencia a la penetración		Aluminio
Conductividad hidráulica saturada	Tasa de descomposición de celulosa	Manganeso
Tamaño de agregados secos (<0,25 mm)	Materia orgánica particulada	Zinc
Tamaño de agregado seco (0,25-2mm)	Carbono activo	Cobre
Tamaño de agregado seco (2-8 mm)	Banco de semillas de malezas	Acidez intercambiable
Estabilidad de agregados húmedos de 0,25 a 2mm	Tasa de respiración microbiana	Salinidad
Estabilidad de agregados húmedos de 2 a 8 mm	Proteínas del suelo	Sodicidad
Dureza superficial	Contenido de materia orgánica	Metales pesados
Dureza sub-superficial		
Infiltración de campo		

Los indicadores se evaluaron por:

- Sensibilidad a los cambios por las prácticas de manejo del suelo.
- Capacidad de ser representativo de procesos del suelo de importancia ambiental y agronómica.
- Consistencia y reproducción.
- Muestreo simple y económico.
- Costo del análisis (lo más económico posible)

- Facilidad de interpretación por parte de los usuarios.

La división de Salud del Suelo de la NRCS (2017) coincide con los puntos presentados anteriormente sobre las características que deberían tener los indicadores para ser de mayor utilidad.

Los indicadores que resultaron seleccionados para la evaluación CASH en base a las características mencionadas son los siguientes:

Físicos:

- - Agua útil: refleja la cantidad de agua que una muestra disturbada de suelo puede almacenar para el uso de una planta. Es la diferencia entre el agua almacenada a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.
- - Dureza superficial: es la medición de la resistencia máxima a la penetración de los primeros 20 cm del suelo. Se usa el penetrómetro.
- - Dureza sub-superficial: es la medición de la resistencia máxima a la penetración en el perfil del suelo desde los 20 a los 60 cm de profundidad. Se usa el penetrómetro.
- - Estabilidad de agregados: indica la resistencia a la desintegración de los agregados del suelo cuando reciben los impactos de las gotas de lluvia. Se mide

Química:

- - Composición química del suelo: análisis tradicional de suelo, con mediciones de pH y los nutrientes disponibles (Fósforo, bases, etc).
- - Indicadores químicos opcionales o contexto-dependientes: Salinidad, sodicidad y presencia de metales pesados.

Biológicos:

- - Materia orgánica: indica el nivel de material carbonado derivado de organismos vivos.
- - Nivel de proteína de suelo: es una medición de la fracción de la MO que contiene la mayor parte del nitrógeno orgánico. Se considera importante debido a que la actividad microbiana lo puede ir mineralizando, dejándolo disponible para el consumo de las plantas. Se hace mediante extracción de citrato bajo alta temperatura y presión.
- - Respiración del suelo: es una medición de la actividad metabólica de la comunidad microbiana del suelo. Se evalúa mediante la medición de la emisión de dióxido de carbono de una muestra de suelo.
- - Carbono activo: representa el carbono de fácil disponibilidad para los microorganismos del suelo, aportando energía y permitiendo mantener saludables las redes tróficas del suelo. Se mide a partir de la cuantificación de la oxidación del permanganato de potasio mediante espectrofotómetro.
- - Opcionales: Tasa de presión por patógenos del suelo y Nitrógeno potencialmente mineralizable. Este último combina la actividad biológica con la disponibilidad de sustrato para mineralizar nitrógeno. Se mide con incubación anaeróbica.

Brussard (2012) sugiere un abordaje que relacione las características, las funciones y los servicios ecosistémicos del suelo mediante indicadores de cada uno de ellos (Figura 3).

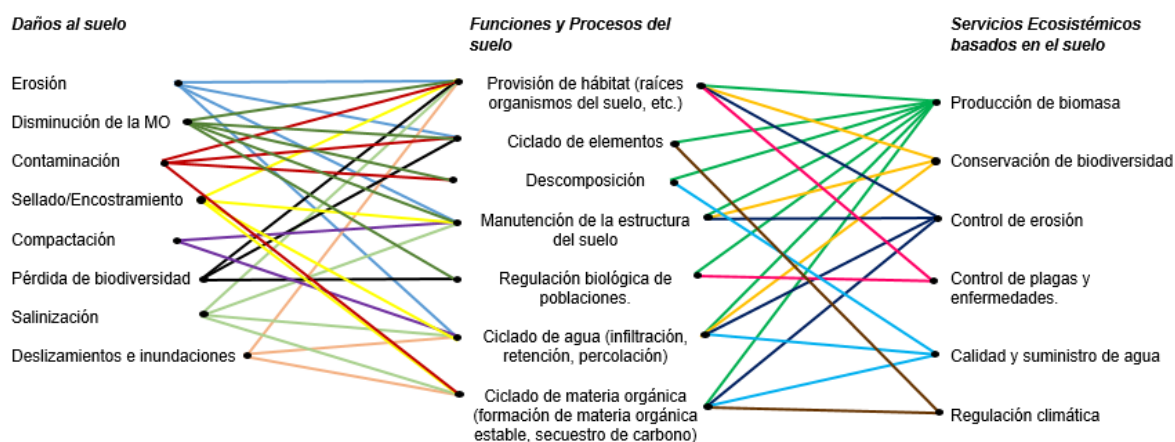


Figura 3. Relación entre características, funciones y servicios ecosistémicos del suelo (traducido de Buneman et al., 2018 adaptado de Brussard 2012).

Con el avance en la investigación sobre la SS han ido apareciendo propuestas para poder agrupar indicadores, formando un grupo de indicadores mínimo de base que logren representar o contener a los demás. Laishram et al., (2012) por ejemplo, proponen una agrupación en 5 indicadores generales que se inter-relacionan con los demás:

- 1) Agregación del suelo: Está fuertemente determinado por la materia orgánica, la actividad microbiana y la textura.
- 2) Infiltración y capacidad de almacenamiento de agua útil: materia orgánica, agregación, conductividad eléctrica, porcentaje de sodio intercambiable (PSI).
- 3) Densidad aparente: materia orgánica, agregación, profundidad del horizonte superficial (relacionado a camadas compactadas), PSI, actividad biológica.
- 4) Biomasa microbiana: materia orgánica, agregación, densidad aparente, pH, textura, PSI, respiración del suelo.
- 5) Nutrientes disponibles: materia orgánica, pH, profundidad del horizonte superficial, textura, parámetros microbianos (tasas de mineralización e inmovilización)

Según Bhaduri et al., (2020) los indicadores seleccionados por cada propuesta deben estar orientados a determinados objetivos. Dependiendo tanto de las características del clima o los suelos de una región así como de sus condiciones socioeconómicas, considerando en este último caso, quienes van a ser los usuarios que utilizaran los indicadores para hacer diagnóstico. A modo de ejemplo, el desarrollo de una serie de indicadores para evaluar la SS será diferente si es totalmente orientada al uso por agricultores que si es orientada sólo a los fines de la investigación científica. Otros focos podrían ser: productividad, protección ambiental o sustentabilidad y seguridad alimentaria (Bhaduri et al., 2020).

Como los servicios ecosistémicos están asociados a variables del suelo que cambian a diferentes velocidades y que pueden ser medidas con diferentes grados de precisión (como se presenta en la tabla 3), es importante poder detectar y sistematizar esas variabilidades para considerarlas tanto a la hora de la elaboración de índices de salud del

suelo como para el diseño de agroecosistemas o el manejo integrado a escala de paisaje (Birgé et al., 2016).

Tabla 3. Variables testeables, sus velocidades de variación, y los servicios ecosistémicos asociados que ayudan a mantener. Las escalas de tiempo aproximada se definen por: muy lento = milenios; lento= centenas; moderadamente lento = décadas; moderadamente rápido = años; rápido= semanas. El nivel estimado de entrenamiento o la experticia relativo a cada uno se define por niveles bajos, medios o altos. Los costos estimados para las mediciones de campo o laboratorio se definen por niveles bajos, medios o altos. Traducido y adaptado de Birge et al., (2016).

Variable	Velocidad de variación o cambio	Servicios Ecosistémicos asociados	Experticia	Costo
Textura	Muy lento	Diversidad del paisaje, productividad primaria, secuestro de CO ₂	Medio-Alto	Bajo-Medio
Profundidad del horizonte	Lento	Control de erosión, productividad primaria	Medio-Alto	Medio-Alto
Compactación/ Densidad aparente	Moderadamente rápido	Generación de la estructura del suelo, control de escorrentía, capacidad de almacenamiento de agua, ciclado de nutrientes	Medio	Bajo-Medio
Agregación	Moderadamente rápido	Control de erosión, diversidad del paisaje/microhábitats, transporte de agua y nutrientes, secuestro de carbono	Medio-Alto	Bajo-Alto
Biomasa de raíces	Moderadamente rápido	Control de erosión, mantenimiento de la biodiversidad aérea y subterránea, estructura del suelo, secuestro de carbono, porosidad.	Medio-Alto	Bajo-Alto
Nemátodos	Moderadamente rápido	Bioturbación, descomposición, porosidad del suelo, biodiversidad, mineralización de nutrientes, secuestro de carbono.	Medio-Alto	Bajo a Alto
Residuos en superficie	Moderadamente rápido	Formación de suelo, microhábitats, secuestro de carbono, estabilidad del suelo, capacidad de almacenamiento de agua	Bajo-Medio	Muy alto
Biomasa fúngica	Rápido a Moderadamente rápido	Biodiversidad, productividad primaria, secuestro de carbono, estructura del suelo, mineralización de nutrientes	Medio-Alto	Alto
Salinidad	Lento	Productividad primaria, biodiversidad, calidad de hábitat	Medio-Alto	Medio-Alto
Microelementos (Fe, Mn)	Lento	Diversidad del paisaje, productividad primaria, secuestro de CO ₂	Alto	Medio-Alto
CIC	Moderadamente lento	Fertilidad del suelo, productividad primaria	Medio-Alto	Bajo-Alto
Carbono total	Lento a moderadamente rápido	Estabilidad del suelo, productividad primaria, secuestro de carbono, capacidad de almacenamiento de agua, biodiversidad	Alto	Medio-Alto
Disponibilidad de nitrógeno	Lento a rápido	Fertilidad del suelo, biodiversidad, productividad primaria, secuestro de carbono	Medio-Alto	Medio-Alto
Materia orgánica total	Moderadamente rápido	Estabilidad del suelo, fertilidad, microhábitat, ciclo del agua, mineralización de nutrientes	Alto	Medio-Alto
pH del suelo	Rápido	Ciclado de nutrientes, actividad microbiana, descomposición	Bajo-Medio	Bajo
Capacidad de almacenamiento de agua	Lento	Suministro de agua, ciclado de agua, ciclado de nutrientes	Medio-Alto	Bajo-Alto
Infiltración	Moderadamente lento	Control de escorrentía, ciclado del agua, ciclado de nutrientes	Bajo-Medio	Bajo-Medio
Descomposición	Rápido	Ciclado de nutrientes, generación de suelo, estabilidad del suelo, fertilidad, bioremediación	Medio-Alto	Bajo-Alto
Compuestos de defensa de las plantas	Rápido	Productividad primaria, control de patógenos, ciclado de nutrientes	Alto	Alto

Varios autores sugieren que es importante trabajar en la elaboración de un índice de salud del suelo que logre integrar a todos los indicadores para poder comparar suelos similares con distintos manejos y diferentes escenarios (Buneman et al., 2018).

Según Lima et al., (2013) el índice de salud de suelos elaborado Karlen y Stott (1994) es uno de los más utilizados para la integración de los diversos indicadores. Ellos seleccionaron a 1) la capacidad de infiltración (CI), 2) capacidad de movimiento-almacenamiento de agua en el suelo y de su absorción por los vegetales (CMAA), 3) resistencia de la superficie a la degradación (RD) y 4) soporte del crecimiento vegetal (SCV), como funciones del suelo asociadas a la calidad del mismo. A estas funciones se le asigna un cierto peso (p) y se afectan por los valores de los indicadores de cada una para luego poder integrarlas en un solo índice. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$\text{Índice de Salud del Suelo} = \text{tasa de CI} \times p + \text{CMA} \times p + \text{RD} \times p + \text{SCV} \times p$$

p = peso numérico de cada función que se define entre 0 y 1.

El peso numérico se define en base a valores de referencia para cada tipo de suelo y clima. Se utilizan valores de base, umbrales máximos y mínimos así como niveles óptimos. Con esta información, se crea un marco de referencia y se elaboran curvas con los rangos de los valores del indicador, ubicados entre 0 y 1.

La selección de los indicadores puede ser realizada basada tanto en la opinión de expertos, como en base a procedimientos estadísticos como con la combinación de ambos e incluso las observaciones de los agricultores (Lima et al., 2012). Por ejemplo Lima et al., (2008) evaluaron la sensibilidad de los diferentes indicadores mediante correlaciones estadísticas para definir cuáles eran los que mejor representaban los cambios en el manejo, los rendimientos, entre otros. De un total de 29 indicadores pudieron generar una serie de datos mínimos necesarios para lograr un indicador representativo ("*minimum data set*").

Lima et al., (2013) evaluaron diferentes sistemas de manejo de arroz en Rio Grande do Sul mediante el método de generación de un índice de salud del suelo (ISS). En la tabla 4 se presenta un posible sistema de integración y valoración de los indicadores.

Tabla 4: Peso asociado (valor entre 0 y 1) a los 29 indicadores seleccionados para evaluar las funciones del suelo consideradas para la formación del ISS. Adaptado y traducido de Lima et al., (2013).

Función del suelo	Peso	Indicador Nivel 1	Peso	Indicador nivel 2	Peso	Indicador nivel 3	Peso
Infiltración, suministro y almacenamiento de agua	0,33	Agua disponible	0,2	Materia orgánica Densidad aparente Microporosidad Estabilidad de agregados en agua Diámetro medio de agregados	0,33 0,33 0,33 0,5 0,5		
		Macroporosidad	0,2				
		Lombrices	0,2				
		Ind. Corr 1	0,2				
		Ind. Corr 2	0,2				
		Suministro, ciclado y reserva de nutrientes	0,33				

Como se puede observar en la Tabla 4, se consideran 3 grandes indicadores que poseen un mismo peso (0,33). Cada uno está integrado por indicadores de primer nivel que poseen su peso propio. De la misma manera hay un segundo y tercer nivel de indicadores que integran a los de mayor grado. Por ejemplo, la función del suelo “Infiltración, almacenamiento y suministro de agua” está constituida por 5 indicadores de primer nivel. Agua disponible (1), macroporosidad (2), lombrices (3), un cuarto indicador correlacionado que en es en realidad la integración de indicadores de nivel 2 (como materia orgánica, densidad aparente y microporosidad) y un quinto indicador, que al igual que el anterior, integra indicadores de segundo nivel como estabilidad de agregados en agua y peso promedio de agregados.

“Todos los pesos dentro del nivel 1 deben sumar 1. Para evitar asignar sobrepeso a los indicadores redundantes en el conjunto de 29 indicadores, se realizó un análisis de correlación de los indicadores” (Lima et al., 2008). “Esto nos permitió tener los indicadores correlacionados ($r > 0,80$) separados en grupos y sus pesos igualmente distribuidos, como se indica en el siguiente nivel” (Lima et al., 2013).

Como se dijo antes, a partir de Lima et al., (2008) se logró realizar una selección entre los 29 indicadores iniciales, que permitió disminuir la necesidad de evaluarlos a todos. Los indicadores que resultaron del proceso selectivo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Peso numérico asociado al grupo de indicadores seleccionados para la evaluación del índice de salud del suelo (ISS) (traducido y adaptado de Lima et al., 2013).

Función del suelo	peso	Indicador nivel 1	Peso	Indicador nivel 2	Peso
Infiltración, almacenamiento y suministro de agua	0,33	Agua disponible	0,25	Materia orgánica Densidad aparente	0,5 0,5
		Diámetro medio de agregados	0,25		
		Lombrices	0,25		
		Indic. Corr.	0,25		
Ciclado, suministro y almacenamiento de nutrientes	0,33	Agua disponible	0,25	Manganeso Cobre Zinc	0,33 0,33 0,33
		Lombrices	0,25		
		Materia orgánica del suelo	0,25		
		Micronutrientes	0,25		
Mantenimiento de la actividad biológica	0,33	Materia orgánica	0,5		
		Lombrices	0,5		

El peso de cada uno de los indicadores debe ser afectado por la puntuación que se le da al indicador mediante las funciones mencionadas anteriormente. De esta manera, considerando valores de referencia, óptimos, umbrales, etc., se obtienen mediante las curvas las puntuaciones que permiten generar valores finales para cada indicador. Con la integración de los mismos a partir de sus valores se obtiene el ISS.

Indicadores cualitativos como parte del conjunto de indicadores para la evaluación de la SS y participación de los diferentes actores como forma de promover estas propuestas.

Por otro lado, también se ha buscado en varias investigaciones incorporar indicadores de observación visual a campo (Buneman et al., 2018; NRCS, 2017). Las evaluaciones

visuales aportan información que no se puede evaluar en los laboratorios, generando no sólo una complementariedad con los análisis cuantitativos de laboratorio sino un proceso de mejora de la percepción del aprendizaje por parte de los agricultores (Buneman et al., 2018).

Algunos de los parámetros que se pueden evaluar a partir de la observación visual según lo revisado por Buneman et al., (2018) son:

- Observaciones generales: capas del suelo, evaluación del horizonte A, grado de encostramiento o encharcamiento superficial, pendiente, erosión del suelo.
- Propiedades físicas del suelo: textura, estructura, consistencia, tamaño y distribución de agregados, forma de los agregados, desagregación y dispersión del suelo, porosidad, color, moteados, agua disponible, infiltración.
- Propiedades químicas: pH, carbono orgánico lábil.
- Propiedades biológicas: lombrices, profundidad potencial de enraizamiento, desarrollo de raíces.

Mientras que ciertas mediciones pueden ser realizadas por los agricultores, otras necesitan de la evaluación por parte de expertos y/o de instrumentos especiales para el muestro y/o revelado.

Moebius-Clune et al., (2016) consideran importante la evaluación visual dentro de la evaluación global de la SS, citando cómo algunos aspectos como el olor del suelo para la evaluación de aspecto biológicos y bioquímicos (olor a putrefacción, olor a fermentación ácida, por ejemplo), o la sensación al tacto cuando se manipula un terrón de suelo (resistencia a la desagregación, forma en la que se desmenuza, etc.), la forma o el nivel de descomposición de la cobertura, como también la evaluación de las plantas, con fuerte foco en las raíces, observando su arquitectura, el grosor y nivel de desarrollo, nodulación en leguminosas, etc.

El uso de indicadores de salud de suelos que tengan sentido/significado para los agricultores que los utilizan probablemente sea una de las formas más fructíferas de lograr que estos sistemas de evaluación se adopten y permitan vincular de manera sinérgica la ciencia con la práctica, logrando de esta manera el objetivo de la sustentabilidad (Roming et al., 1995).

De hecho, hay un interés creciente sobre el saber de los agricultores acerca de la salud de los suelos y sobre cómo lograr generar conocimientos a partir del trabajo conjunto de investigadores, agricultores, extensionistas y demás partes involucradas (Barrios, 2007; Nezomba et al., 2017; Lima et al., 2013). Barrios (2007) destaca por ejemplo, la importancia de reconocer el valor que posee el conocimiento sobre plantas espontáneas para poder utilizar como indicador en los diagnósticos sobre los suelos. Nezomba et al., (2017) y Lima et al., (2013) trabajaron con agricultores en la sistematización de criterios de evaluación de suelos y los compararon con los resultados obtenidos por los diagnósticos convencionales (físico-químicos) obteniendo resultados que demostraban la consistencia de las apreciaciones de los agricultores por un lado y la necesidad de tenerlas en consideración para la elaboración de los índices de salud global por el otro.

Según Moebius-Clune et al., (2016) la propuesta de incorporar los indicadores generados a partir de las observaciones de campo (tanto las realizadas por agricultores como por profesionales) da lugar a la subjetividad y puede generar desviaciones. Sin embargo, en un abordaje holístico con una lógica integradora, estos resultados pasan a formar parte de un cuerpo amplio de indicadores; además de que resulta más valioso un índice donde están incluídas las observaciones de los agricultores que aquel donde no sean consideradas. Esto no sólo se fundamenta en el enriquecimiento del índice por el conocimiento local sino por la posibilidad de involucrar a los agricultores en la generación de diagnósticos, que le permitan percibir de mejor manera el estado de salud de sus suelos y, además, les posibiliten comunicarlo (por ejemplo, a otros agricultores). Por eso, esta propuesta tiene tanto valor desde el punto de vista de la investigación como desde la educación y la comunicación (Moebius-Clune et al., 2016).

La evaluación de la SS debe servir de insumo para la toma de decisiones y sucede en ciertos casos, que la pérdida de servicios ecosistémicos se da de una forma gradual e imperceptible para los agricultores y demás partes involucradas. En este sentido, Birge (2016) propone un modelo de manejo adaptativo donde, a partir del desarrollo de hipótesis, el testeo de las mismas y el ajuste del manejo en relación a los resultados obtenidos, se pueda generar una base de criterios para poder mantener la salud del suelo y los servicios ecosistémicos asociados (Figura 4). De esta manera, los agricultores logran evaluar de forma sistémica el impacto de sus manejos y les permite ir planificando acciones a futuro para el desarrollo sustentable de su actividad productiva.

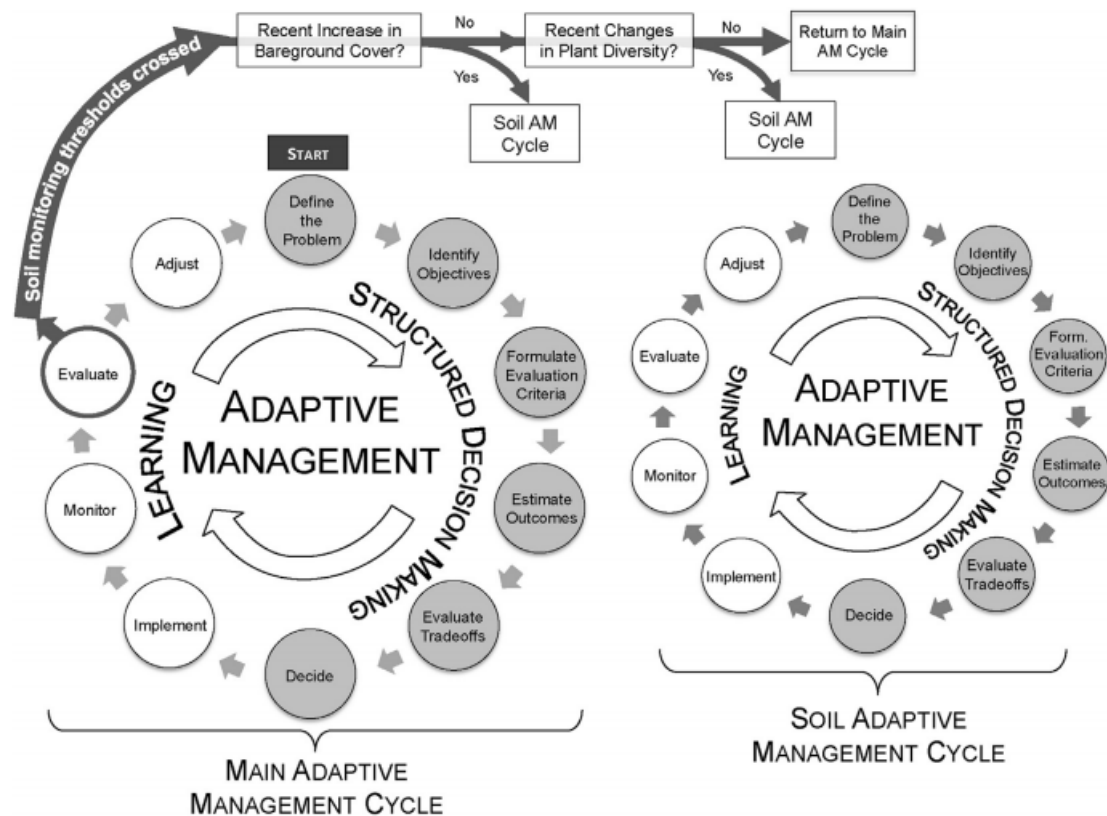


Figura 4: Esquema de la propuesta de Manejo Adaptativo con foco en el suelo (Birgé et al., 2016)

Como se puede observar en la Figura 4, la propuesta se divide en dos etapas. En la primera se define un marco o estructura básica para la toma de decisiones, mientras que en la segunda parte se plantea un proceso de aprendizaje por la práctica. El comienzo radica en la necesidad de definir correctamente el problema, para lo cual es fundamental el diagnóstico con una mirada holística. Una vez definido el problema se plantea identificar objetivos, formular criterios de evaluación para los mismos y poder estimar resultados considerando posibles concesiones/compensaciones, para luego tomar una decisión. Una vez que se cuenta con una decisión basada en un plan organizado, se pasa a la fase de implementación donde se monitoreará, evaluará y ajustará lo que sea necesario. De esta manera, se genera un ciclo de manejo adaptativo permanente.

Consideraciones finales

Como se pudo ver hasta el momento, son diversas las metodologías propuestas para evaluar la salud de los suelos. Pero en general, se podría decir que se observan muchos puntos en común que están presentes en los diversos trabajos y que coinciden en ciertos aspectos clave como:

- Importancia de ampliar no solamente el horizonte de evaluaciones (incorporando nuevas mediciones, sobre todo biológicas) sino también la forma en la que se interpretan los resultados, esto es, analizar resultados con una mirada integral y holística.
- Importancia de la vinculación de los indicadores a los servicios ecosistémicos y a las funciones del suelo.
- Importancia de la generación de sistemas de evaluación que arrojen resultados que permitan hacer diagnósticos integrales y proponer estrategias de manejo.
- Importancia de la apropiación de las metodologías por parte de todos los actores involucrados con especial énfasis en los agricultores. Promover la participación.
- Importancia de la generación de indicadores globales que sirvan para la formulación de políticas públicas, como por ejemplo programas nacionales o regionales para la mejora de la salud de los suelos y los servicios ecosistémicos.

PARTE 2. ANÁLISIS DE LA SALUD DEL SUELO MEDIANTE LAS CROMATOGRAFÍAS CIRCULARES DE PFEIFFER (CCP).

Origen y descripción de las CCP

Las cromatografías circulares de Pfeiffer vienen ganando popularidad entre agricultores y profesionales de campo, quienes en muchos casos, desde la Agroecología, buscan evaluar la salud de los suelos con metodologías más integrales, simples y económicas.

El estudio del suelo se ha basado principalmente en análisis cuantitativos, aislando las propiedades físicas, químicas y biológicas. Investigadores, agricultores y demás personas involucradas en el manejo del suelo, necesitan herramientas que permitan evaluar de manera integral las interacciones de los diferentes componentes; ya que es partir de estas relaciones que se determina la salud del suelo. Entre los enfoques que podrían contribuir con este objetivo se encuentran los análisis cromatográficos de Pfeiffer (Granatstein & Bezdicek, 1992).

La cromatografía deriva de *croma* que hace referencia al color mientras que el sufijo –*grafía*– significa tanto “escrito” como “campo de conocimiento”. Cromatografía significa, entonces, “escribir en colores” y bajo este contexto se entiende como un campo de estudio mediante el cual esos colores se plasman en una superficie que funciona como reveladora. Justamente su origen se basó en la separación de colorantes. Es un método físico de separación de componentes presentes en una mezcla a partir de los desplazamientos de la llamada fase móvil sobre una fase estacionaria. Según los diferentes tipos de fases se hablará de varios tipos de cromatografías (Muñoz & Túnez, 2004).

La Cromatografía Circular de Pfeiffer (CCP) se caracteriza por analizar mezclas complejas como suelos, abonos, alimentos, entre otros. La fase estacionaria en este método es un papel filtro impregnado con nitrato de plata (AgNO_3) y la fase móvil es una solución de suelo con hidróxido de sodio (NaOH). Este análisis no se realiza con el objetivo de separar totalmente los componentes, sino con la intención de visualizar como están interligados o integrados. La separación de los componentes del suelo en las CCP es parcial,

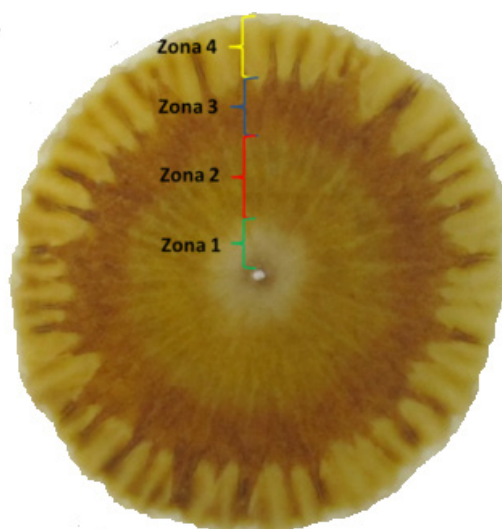
debido a su alta complejidad, dada en parte por sus mecanismos de agregación. En las CCP se evalúan, justamente, los patrones de integración entre los componentes (Pfeiffer, 1984; Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

Es un método muy poco difundido en el ámbito científico, pero que va ganando relevancia, ya que se está percibiendo que puede ser una herramienta con potencial para contribuir con abordajes multidimensionales sobre la fertilidad y con la mejora de la capacidad para la toma de decisiones sobre los manejos en relación a los diagnósticos que se van obteniendo (Pilon et al., 2018).

Las CCP se utilizan para la evaluación de los suelos, buscando generar nuevas formas de interpretar la salud de los mismos (Pfeiffer, 1984). Este autor, entendía que los análisis químicos no eran suficientes para explicar las expresiones de la vegetación y los cultivos; interpretaba que existían diversos procesos que interactuaban permanentemente generando la fertilidad del suelo y que era necesario desarrollar un método que pueda detectarlos.

Las CCP estuvieron durante muchos años restringidas a pequeños grupos de investigadores, técnicos y agricultores, principalmente dentro de la Agricultura Biodinámica. Recién a partir de los trabajos de campo de dos ingenieros agrónomos (Restrepo Rivera y Pinheiro), quienes rescatan los conocimientos de Pfeiffer y elaboran una propuesta (tanto desde lo metodológico como desde la parte de interpretación) es que su uso se populariza, primero en América Latina y luego en varias partes del mundo.

La propuesta de Restrepo Rivera y Sebastiao Pinheiro se encuentra resumida en el libro “Cromatografías: imágenes de vida y destrucción del suelo” (2011), en donde se comparten no sólo la historia, metodología y fundamento de la técnica sino cientos de cromatografías elaboradas por ellos mismos en diferentes partes del mundo. Estos dos autores son los máximos referentes de la técnica en la actualidad y es por este motivo



que la mayoría de los trabajos científicos actuales citan su obra como referencia.

Figura 5. Cromatografía Circular de Pfeiffer y sus zonas (Pilon et al., 2018).

Las zonas representan secciones específicas de las CCP que se originan a partir de los diferentes tamaños y velocidad de circulación de las sustancias que se desplazan por el papel. Restrepo Rivera y Pinheiro (2011) las definen como zona interna (1), zona mineral (2), zona de materia orgánica (3) y zona externa o enzimática (4). Los nombres se corresponden con el tipo de sustancias que se depositan en cada sector según los autores. Por ejemplo, se asume que en la zona mineral se depositan mayoritariamente partículas órgano-minerales. En algunas CCP las zonas son bien definidas, en otras son muy difusas o casi inexistentes, mientras que en otras se observan integradas-entrelazadas.

Según Pinheiro (2011), en una CCP se puede analizar de manera general la salud del suelo a partir de los patrones de distribución y las expresiones de los colores. Los componentes macro del suelo, como la fracción mineral coloidal, la materia orgánica, las sustancias orgánicas simples, así como las enzimas y nutrientes se irán separando parcialmente y expresando una determinada “imagen (o foto) del suelo”. Según este autor, a partir de la CCP se puede observar si un suelo tiene baja actividad biológica, si posee sustancias nitrogenadas simples o complejas o un cierto nivel de agregación entre las fracciones orgánicas y minerales, por ejemplo.

Sucede en muchos casos, que los análisis de suelos son costosos o difíciles de interpretar por parte de los agricultores. En este sentido, las CCP son análisis simples, prácticos y económicos que ayudan a los agricultores en la generación de diagnósticos del estado de sus suelos. Esto contribuye a la generación de conocimiento por parte de los agricultores, que pueden ir observando y evaluando como sus prácticas repercuten en el suelo (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

Técnica de la CCP

El paso a paso de la técnica es el siguiente:

- La muestra de suelo recolectada a campo (el muestreo a campo es igual al realizado para un análisis químico convencional), se secan en estufa (a 40°C) o al aire y luego se homogeneiza con un mortero, haciéndola pasar por una malla de 2 mm.
- Se pesan 5 gramos de suelo seco y tamizado y se prepara con éste una solución con NaOH (50 ml de solución al 1%)
- En paralelo se prepara una solución de AgNO₃ al 0,5% para impregnar los papeles de filtro grado 1 de 11 micrómetros de tamaño de poro (Qualitative Filter Papers).
- El proceso de impregnación se realiza con la ayuda de una caja de petri, haciendo ingresar la solución desde el centro por un rollito del papel filtro hasta los 4 cm de radio como se muestra en la figura 6. Una vez alcanzado este límite los papeles se guardan en una caja oscura para su secado.
- La solución de suelo se mezcla mediante agitación en tres etapas (tiempo 0, a los 15 minutos y a los 60 min) y entre las etapas de agitación, la solución se deja en reposo. Finalizada la última agitación, la solución se deja en reposo absoluto durante 6 horas para que decanten las partículas más grandes.
- Transcurrido este tiempo se extrae el sobrenadante de la solución con una jeringa, se lo deposita en una caja de petri y mediante un rollo de papel filtro se lo hace ingresar al papel circular para que la solución pueda correr horizontalmente hasta los 6 cm de radio como se muestra en la Figura 6.

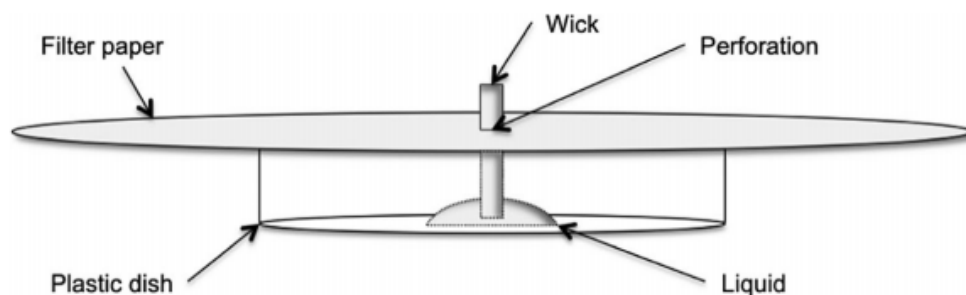


Figura 6: Representación del proceso de impregnación del papel de filtro en una cromatografía de Pfeifer. Tomada de Kokornaczyk, et al., 2016.

Filter paper = papel filtro; plastic dish = caja de petri; liquid = solución de suelo; perforation = perforación del papel filtro; wick = rollo de papel filtro.

El líquido ingresará al papel por capilaridad y se irá desplazando hasta llegar a un borde definido por metodología (6 cm desde el centro). En su recorrido por el papel, las diferentes partículas del suelo se van a ir depositando según su tamaño, peso, reactividad y demás características particulares. En este pasaje suceden dos procesos simultáneos: I) separaciones físicas; y II) diversas reacciones químicas, las cuales se darán, entre las partículas-solutos de la solución suelo, el AgNO_3 y el NaOH . Una vez terminado el pasaje (demora segundos o pocos minutos), la cromatografía se deja secar y luego se revela con el efecto de la luz, que, al reaccionar con la plata, origina su precipitación y permite la expresión de diversos colores (Pfeiffer, 1984; Retrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

El proceso de revelación debe realizarse en un lugar con luz tenue, evitando la luz directa sobre los papeles. El revelado demora de 5 a 15 días, dependiendo las condiciones de secado (Retrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

Una descripción resumida de la metodología puede encontrarse en Pilon et al., (2018).

Las sustancias del suelo extraídas por la reacción con el NaOH tendrán tamaño, estructura, peso molecular y cargas eléctricas particulares que darán origen a una distribución bajo un cierto patrón de organización en el papel. Se formarán así, anillos, canales y formas específicas para cada tipo de solución. La presencia del AgNO_3 , a su vez, al reaccionar con los componentes del suelo dará origen a sustancias orgánicas con plata, que, con la acción de luz, tendrán una reacción de oxidación-reducción expresando así diferentes tonalidades. Este revelado que presenta formas y colores permite a las personas contar con una imagen que resume un cierto estado del suelo Pilon et al., (2018).

Fundamento del método

El método genera una dispersión física mediante las agitaciones circulares y una química mediante la acción del NaOH, las cuales desagregan en cierto grado las partículas, que se separarán en el posterior proceso de decantación durante las 6 horas de reposo de la segunda etapa. La separación física está basada en la ley de Stokes, con las diferentes velocidades de decantación de las partículas en un líquido. Mientras que la separación química, se relaciona con la reacción del NaOH con la materia orgánica y los compuestos órgano-minerales. En la última etapa, la muestra al ingresar al papel va reaccionando con el AgNO_3 mientras se desplaza hasta los bordes. La exposición final del papel a la luz permite la expresión de una serie de colores a partir de la precipitación de plata metálica que reaccionó con los diversos compuestos de la solución de suelo.

El fundamento del método podría dividirse en 3 etapas generales:

Etapas 1: Extracción o solubilización alcalina.

Etapas 2: Decantación por tiempo de reposo

Etapas 3: Reacción con nitrato de plata y revelado con luz.

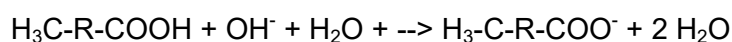
¿Existe un respaldo científico para el método? Un repaso sobre la pertinencia del fundamento para cada etapa y para el método en general.

Etapas 1: extracción o solubilización alcalina

Según Olk et al., (2019) la extracción alcalina de materia orgánica del suelo se ha utilizado por más de 200 años; este método se ha usado fundamentalmente por la alta capacidad de reaccionar con los compuestos de carbono del suelo, removiendo hasta el 80% de la materia orgánica del mismo. Habitualmente se usa el NaOH como extractante, incluso uno de los procedimientos de extracción alcalina más conocidos está vinculado al proceso de fraccionamiento químico para el estudio de sustancias húmicas, donde las sustancias solubilizadas por el NaOH son llamadas ácidos húmicos y fúlvicos, mientras que las sustancias que resultan insolubles se clasifican como huminas (Olk et al., 2019).

El principio de la extracción alcalina se basa en el efecto de los iones de sodio y los oxidrilos en una solución de suelo a pH alcalino. Una solución con 0,1M de NaOH posee un pH de alrededor de 13. En estas condiciones, el sodio desplaza al calcio de las superficies coloidales (por concentración), provocando la desagregación y la dispersión de estas partículas, mientras que la abundancia de oxidrilos genera que tanto los compuestos orgánicos como los minerales queden con cargas negativas (provocando así la disociación de sus protones H⁺). De esta manera se generan los procesos de desagregación, dispersión y desorción de las sustancias orgánicas y minerales (Chen et al., 2019).

Diversas fracciones de la materia orgánica tienen en su composición grupos funcionales que se ionizan con el agregado de los iones de una base OH⁻. La extracción alcalina solubiliza aquellos compuestos orgánicos que tienen grupos funcionales ionizables para ese pH. Por ejemplo, la turba se torna parcialmente soluble en agua sólo cuando se le agrega una base como los oxidrilos (OH⁻) como se puede ver en la siguiente reacción (Kleber & Lehman, 2019):



Los protones de los grupos carboxílicos y fenólicos, entre otros, son reemplazados por los iones de sodio; por lo que todos los enlaces que mantenían a las moléculas de materia orgánica unidas entre ellas y con los minerales (como puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas, o catiónicas di o trivalentes) quedan disminuidos. De esta manera, la materia orgánica queda “disuelta” en agua, se solubiliza una fracción orgánica y órgano-mineral que antes estaba insoluble (Lamar, 2018).

Según Kleber & Lehman (2019) además de los factores físicos comunes, como la temperatura y la presión, la eficiencia de la solubilización a través de la alcalinización depende de:

- El tipo de grupo funcional presente (alcohólico, fenólico, carbonil, carboxílico, etc).
- La propensión de cada grupo funcional presente en la mezcla a disociar protones.
- El tamaño y la composición del residuo orgánico al que está unido el grupo funcional.

- El número y la distribución de los grupos funcionales por molécula (por ejemplo, si tiene grupos polares y no polares en sus extremos, etc).

En la medida que la materia orgánica tratada tenga más moléculas con grupos carboxílicos y fenólicos, mayor extracción de sustancias se logrará con el método (Kleber & Lehman, 2019).

En ciertos experimentos, se comprobó que la estructura química de la celulosa, la lignina de Van Soest y la de la turba fueron modificadas significativamente por soluciones de 0,1M de NaOH. Sustancias aromáticas con grupos funcionales como C, C-O y OCH₃ y grupos carboxílicos en general se encontraron en alta presencia cuando se efectuaron procedimientos de extracción alcalina y se compararon con la materia orgánica sin tratar (Chen et al., 2019)

Los productos de la extracción alcalina pueden derivar de diversas sustancias como la biomasa microbiana, fragmentos de plantas en descomposición, complejos órgano minerales, etc. Todos estos tendrán diferentes niveles de reactividad, por lo que la solución alcalina resultante tendrá diversos componentes. Se puede afirmar entonces que la composición de cada suelo afectará marcadamente la composición de la solución alcalina. Por ejemplo, suelos con mayor presencia de compuestos producto de la actividad fúngica tendrán menos reactividad con el álcali por sus características (“más huminas”, mayor relación C/N, más lignina) (Kleber & Lehman, 2019).

En consecuencia, la solución de NaOH utilizada en la metodología de las CCP creará puntos de disociación de diferentes sustancias orgánicas (ácidos orgánicos por ejemplo) que luego, posiblemente, reaccionaran con la el AgNO₃.

Por otro lado, las soluciones con 0,1 molar de NaOH también son capaces de provocar cambios significativos en la composición de las sustancias que forman parte del suelo. Por ejemplo: condensación entre aminoácidos y grupos C=O de azúcares reducidos y quinonas; disolución de componentes estructurales y protoplasmáticos de los tejidos de materia orgánica fresca; auto-oxidación de algunos componentes orgánicos también pueden ocurrir (tanto en la solución como en el secado previo durante la exposición al aire); asociaciones orgánico-minerales se pueden crear por la disolución y la re-precipitación del sílice (Chen et al., 2019)

La descomposición mediante procesos oxidativos en el suelo genera una mayor presencia de grupos funcionales reactivos con oxígeno, que son propensos a reaccionar con el extractante alcalino. Por lo tanto, en la medida que aumenta el grado de oxidación de la materia orgánica, aumentará también la reactividad con el NaOH (Kleber & Lehman, 2019). Esto último justificaría por qué las CCP de compostajes en diferentes grados de procesamiento arrojan diferencias en sus colores y patrones. Aunque es una diferencia que también se observa en los CCP de suelos con diferentes historiales de manejo, en las muestras de compostaje de diferentes edades, las diferencias son significativas, como se verá más adelante en las CCP realizadas por Kumar et al., (2014).

Etapas 2: decantación por tiempo de reposo

Las fracciones de arena decantan totalmente en cuestión de minutos, en tanto que según la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo, la separación entre limos y arcillas ocurre normalmente entre las 8 y las 12 horas de sedimentación. El tiempo exacto es difícil de determinar, por lo que hay diferentes metodologías, donde se consideran 6-8 horas y 12-15 horas como dos tiempos de medición que podrían dar una idea más precisa sobre las cantidades de limo y arcilla (Medina González et al., 2007). Según estos autores, en general, se sugiere la medición final a las 24 horas, garantizando de esta manera la presencia del material coloidal únicamente.

En concreto, en la metodología de las CCP, con el reposo de 6 horas de la solución alcalina de suelo, se garantizaría la decantación de las partículas de arena y quedarían en suspensión las sustancias coloidales junto con los limos finos.

Etapas 3: Reacción con nitrato de plata y revelado con luz

Las tinciones con plata son usadas habitualmente para detectar proteínas luego de las separaciones por electroforesis sobre geles de poliacrilamida. Son muy utilizadas, dentro de los métodos para detección de proteínas, por la excelente sensibilidad de la plata para reaccionar con bajas cantidades de proteínas (en el orden de nanogramos inclusive) (Chevallet et al., 2006).

Los procesos de reducción de la plata han sido estudiados ampliamente debido a su uso en fotografía. El ion de plata (Ag^+) que se reduce ganando un electrón forma la plata metálica (Ag^0), originando una coloración característica. La plata es uno de los elementos con mayor potencial de reducción junto con el mercurio (Hg) y el oro (Au) por ejemplo. La energía lumínica del sol es suficiente para provocar la reducción de estos metales (Rabilloud, 1990).

El fundamento del método de detección por tinción es muy simple: las proteínas reaccionan con los iones de plata formando enlaces en la primera etapa, luego, mediante la generación de condiciones apropiadas para la reducción, el ion de plata se reduce a plata metálica originando colores característicos que definen la tinción (Chevallet et al., 2006). Un fenómeno clave, característico de la plata es la propiedad auto-catalítica, siendo en la fotografía un proceso que permite mediante la ayuda de la luz el desarrollo de la imagen a partir de la formación de plata metálica negra (Rabilloud, 1990).

Si una solución de proteínas es expuesta a un ambiente alcalino (pH 13 aproximadamente) de una solución con NaOH, algunos grupos funcionales quedaran con sus cargas negativas expuestas y reaccionaran así con los iones de plata (Rabilloud, 1990), es decir, sucede lo mismo que con una solución con presencia de materia orgánica.

Se ha demostrado en experimentos cómo la plata forma fuerte complejos con ácidos húmicos y fúlvicos previamente aislados, así como con los hidróxidos de hierro y manganeso. Experimentos de sorción también han demostrado que la plata reacciona más con los suelos que poseen mayores niveles de materia orgánica (Kleja et al., 2016). Se ha estudiado, también, que en aguas naturales la plata puede reaccionar tanto con iones simples como cloruros, tiosulfatos y iones reducidos de azufre, como con sustancias orgánicas simples como tioles (por ejemplo cisteína) o grupos reactivos de carbono orgánico disuelto (*dissolved organic carbon*) (Chen et al., 2012).

La coexistencia de plata y sustancias orgánicas reductoras en un medio alcalino genera una alta tasa de reducción de la plata (Merril, 1986). Por otro lado, varios estudios han observado que la luz es muy importante para estimular el proceso de reducción de la plata. Rabilloud (1990) menciona: *“Los mecanismos por los cuales la luz podría mejorar la formación de imágenes latentes es la absorción directa de luz por nitrato de plata o*

haluros de plata o la transferencia de energía al ion de plata por los grupos absorbentes de luz en las proteínas”.

Los fotones de la luz estimulan la liberación de electrones que se combinarán con los iones de plata formando plata metálica. *“En general, se acepta que un solo átomo de plata sufrirá rápidamente oxidación, volviendo a un ion de plata, a menos que se formen átomos de plata adicionales cerca. Una vez que se forma un número crítico de átomos de plata en una región local, se reducen de manera estable y pueden servir como centro autocatalítico para la reducción de iones de plata adicionales. La tasa de reducción de iones de plata después de la formación fotocatalítica de plata metálica estable depende de la disponibilidad de electrones o del potencial de reducción de oxidación local”* (Merrill, 1986).

Las tinciones de plata en general producen colores marrones y naranjas. Pero la coloración depende del tipo de péptidos involucrados en las reacciones y del nivel de reacción entre la plata y las sustancias de la solución. Se pueden observar desde colores negruzcos (situación en las que hubo poca o nula reducción de la plata) o colores diversos en la gama de los ocre, colorados, marrones, amarillos, anaranjados, etc. (Rabilloud, 1990). Las tinciones son monocromáticas en la gama de los marrones en general, aunque los colores de tinción de la plata pueden ser azulados cuando reacciona con ciertas lipoproteínas mientras que puede ser amarillento, rojo o marrón cuando lo hace con glicoproteínas (Merril, 1986).

La coloración obtenida también está influenciada fuertemente por el nivel de agregación de los granos (*“grains”*) y esto se define en parte por la velocidad de todos los procesos de reducción de la plata que fueron sucediendo en la solución. Esta velocidad depende de la fortaleza o el nivel de unión del complejo entre las zonas de iones de plata y proteínas, por lo tanto, depende de la secuencia y de la concentración de las mismas. La hipótesis es que estas zonas débilmente teñibles corresponden a zonas de plata estrechamente complejas, en las que el complejo, justamente, no puede reducirse fácilmente a plata metálica. Por lo tanto, toda zona con alta complejación de proteínas con plata conduce a una mayor acumulación de plata que las zonas débilmente acomplexadas, lo que se revela con la aparición de los colores (Rabilloud, 1990).

Se ha demostrado que los aminoácidos básicos, lisina e histidina, así como lo que contienen grupos con azufre, son factores importantes en los procesos de tinción de proteínas. Mientras que las purinas lo son para la tinción de ácidos nucleicos. Varias tinciones presentan relaciones curvilíneas con la densidad de plata y la concentración de proteínas y ácidos nucleicos, por lo que se sugiere que puede usarse incluso para análisis cuantitativos (Merril, 1986).

Por otro lado, es importante mencionar que la formación de complejos entre la plata y las proteínas reduce marcadamente el potencial de reducción de la plata, es decir, se torna mucho menos susceptible a la reducción. Por ejemplo los complejos de diamina de plata y los complejos formados en medios alcalinos como el hidróxido de plata (AgOH) (Rabilloud, 1990).

En algunos casos, se sabe que la tinción se ve afectada por el nivel de organización de las sustancias, es decir, en la medida que hay mayor complejidad molecular, la tinción se dificulta por la barrera de la interfase física. La formación de la imagen también depende de un factor físico como la formación de centros de nucleación de plata reducida. En los procedimientos de electroforesis se agregan compuestos específicos mejoradores de imagen que se basan en este principio (centros de nucleación) (Merril, 1986).

El color que se genera depende de variables como el tamaño de las partículas de plata, la distribución de estas partículas y el índice de refracción del gel de la electroforesis o el soporte utilizado para la tinción. (Merri (1986) afirma: *“En general, los estudios con emulsiones fotográficas han demostrado que los granos más pequeños (menos de 0.2 micrones de diámetro) transmiten luz rojiza o amarilla-roja, mientras que los granos por encima de 0.3 micras dan colores azulados, y los granos más grandes producen imágenes negras. Las modificaciones de los procedimientos de tinción de plata, como la disminución de la concentración de agente reductor en la solución de revelado de imágenes, la prolongación del tiempo de revelado, la adición de álcali o la elevación de la temperatura durante la tinción a menudo mejorarán la formación de color. Se ha demostrado que los grupos laterales de aminoácidos cargados juegan un papel importante en la formación del color”*.

En síntesis, dando una cierta generalización, se podría decir que en la medida que existan más proteínas con potencial reductor presente, se observaran más plata reducida y por lo

tanto mayor grado de tinción; mientras que en la medida que haya menos potencial reductor en la solución se observa menos tinción (Merril, 1986).

Análisis general del fundamento

En base a lo visto hasta el momento, se puede apreciar que el fundamento de la CCP está basado en la combinación de varios métodos de separación y detección de sustancias. Se podría decir que la CCP genera una imagen a partir del revelado de las sustancias que reaccionaron con la plata y de sus interfaces. También, la forma en la que se separan las sustancias en el papel de las CCP indicaría el nivel de complejidad o de estabilidad molecular de las partículas de la solución de suelo. Esto llevaría a una idea sobre el estado del suelo a partir de la consideración de los procesos que ocurren en el mismo. Entre ellos quizás se podría destacar, niveles de formación de materia orgánica y su composición (sustancias más complejas, sustancias simples, ácidos orgánicos, carbono orgánico disuelto), niveles de biomasa microbiana y productos microbianos (enzimas, membranas, fenoles, etc.), niveles de agregación del suelo, nivel de sustancias órgano-minerales, etc.

En concreto, se podría decir que la las partes que constituyen el método de análisis mediante la CCP tiene un fundamento en investigaciones científicas probadas. Lo que resultará necesario estudiar y evaluar es el método integral de las CCP y corroborar tanto su pertinencia como su consistencia en la capacidad de arrojar resultados sobre la salud del suelo.

En los últimos años se han publicado algunos trabajos que intentaron estudiar estos aspectos mencionados. En base a la revisión bibliográfica realizada se podrían distinguir dos tipos de trabajos:

- 🌈 Los que se enfocaron básicamente en realizar las CCP de diferentes suelos y/o en diferentes momentos para evaluar según los criterios propuestos por Pfeiffer, Pinheiro y Restrepo Rivera. Estos trabajos arrojan resultados consistentes en general con lo que dice la bibliografía de base, por ejemplo, las CCP de los suelos con altos niveles de degradación contrastan fuertemente con las CCP de las áreas de referencia (generalmente áreas de vegetación nativa en reservas o similares).

Son muy útiles para visualizar cómo en diferentes lugares y condiciones se mantienen los resultados contrastante.

- Los que se enfocaron en realizar comparaciones entre los resultados obtenidos con las CCP y los métodos tradicionales de evaluación de suelos mediante programas estadísticos. Por más que todos los resultados son recientes y parciales, estos trabajos dan el puntapié inicial para la investigación sobre la pertinencia de las CCP como método científico de evaluación integral del suelo.

Criterios de base para la investigación en CCP

En general, a la hora de analizar las CCP, la mayoría de los trabajos se basan en la propuesta de diferenciar zonas, patrones/formas y colores (Figura 7). Algunos incluyen mediciones de las zonas (amplitud) y análisis de textura.

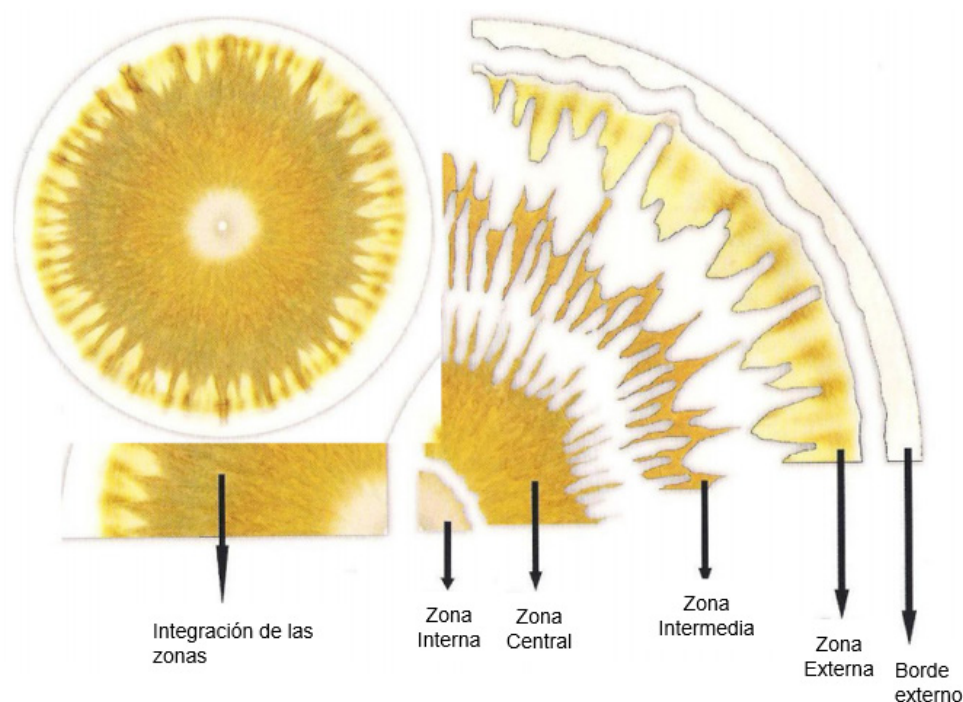


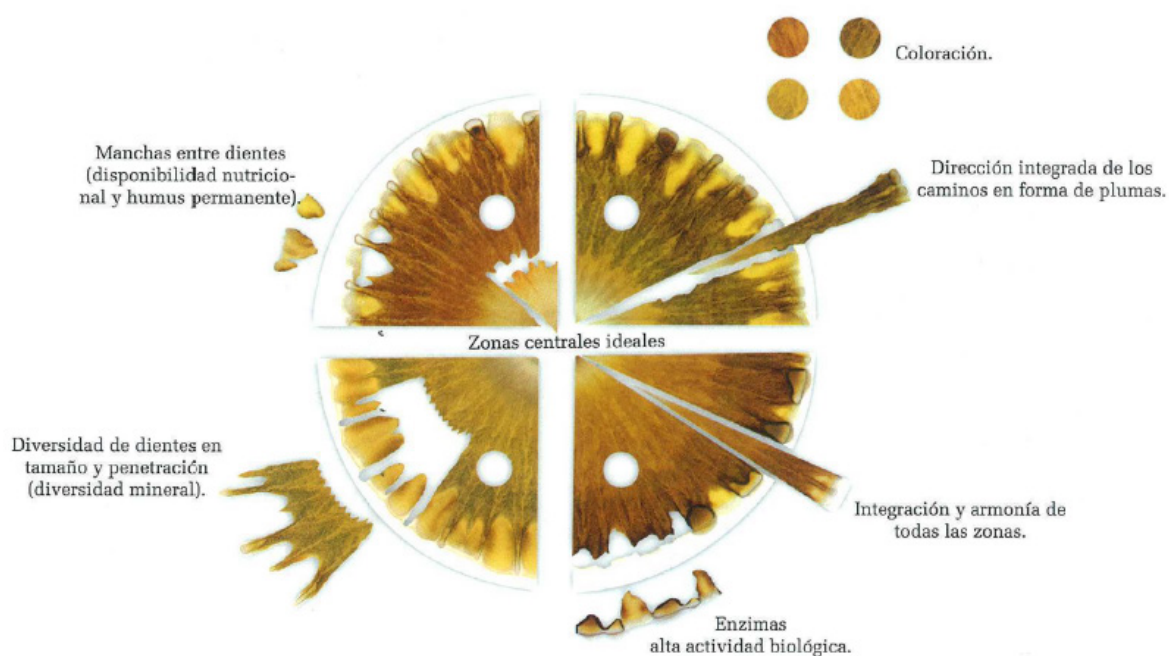
Figura 7. Cromatografía Circulares de Pfeiffer de un suelo indicando las diferentes zonas adaptado de Restrepo Rivera & Pinheiro (2011).

Estos autores se refieren a la Zona central también como zona mineral, mientras que la zona intermedia también la denominan zona de la materia orgánica y a la zona externa, zona enzimática. Como se dijo antes, utilizan estos nombres para facilitar la comprensión de las CCP.

La cromatografía de la Figura 7, según Restrepo Rivera & Pinheiro (2011), representa un suelo saludable. Se pueden apreciar las diferentes zonas y la integración de las mismas. En los trabajos se utilizan estas cromatografías como referencia. Se consideran las zonas por separado y se le da una puntuación en general. Mientras algunos trabajos diferencian las 4 zonas, otros analizan conjuntamente la zona interna con la central, resultando en 3 zonas totales a diferenciar en las CCP.

Las características de color, forma y/o patrón se analizan por separado, en ciertos casos para toda la cromatografía y en otros para cada zona particular.

En la Figura 8 se pueden observar algunas características de las formas y patrones que



indican que la CCP analizada pertenece a un suelo saludable.

Figura 8. Cromatografía Circulares de Pfeiffer de un suelo saludable indicando sus diferentes partes según Restrepo Rivera y Pinheiro (2011).

Los CCP de suelos con altos niveles de degradación suelen presentarse como marco de referencia para la valoración. En la Figura 9 y 10 por ejemplo, se observan cromatografías de suelos en sus extremos (negativos y positivos) de referencia y estados intermedios.

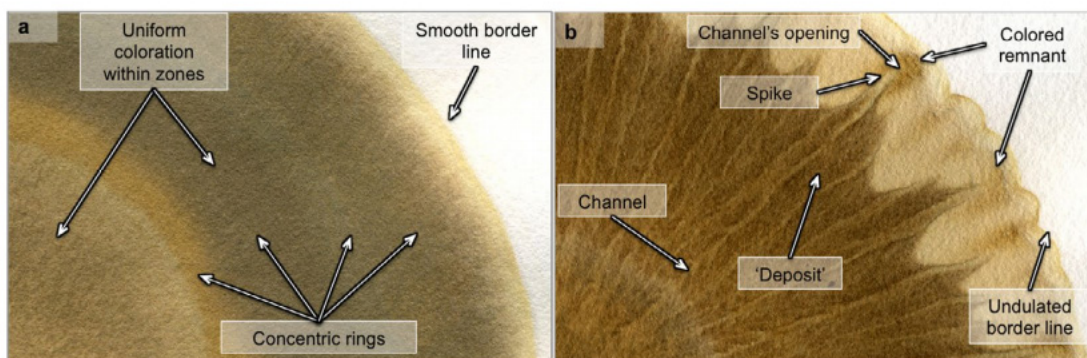


Figura 9: Ejemplos de las zonas de las Cromatografía Circulares de Pfeiffer mostrando los patrones y coloraciones. 9a: anillos concéntricos, coloración uniforme y el borde liso; y 10b: patrones radiales, con canales, picos, variaciones de color y una zona externa con bordes ondulados (Kokornaczyk et al., 2018).

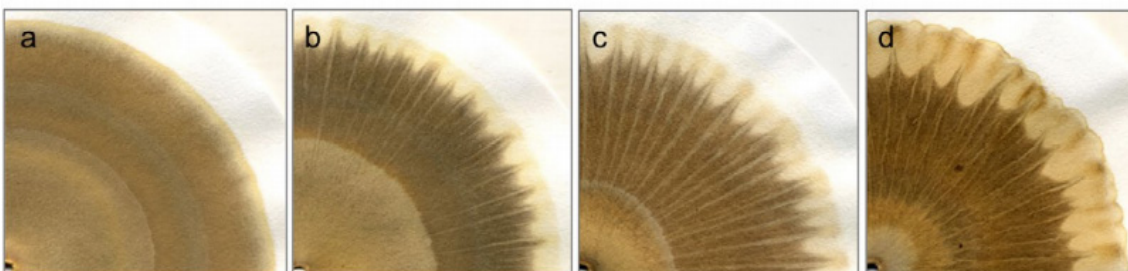


Figura 10: Ejemplos de las zonas de las Cromatografía Circulares de Pfeiffer mostrando los patrones y coloraciones. 10a: patrones de anillos concéntricos bien definidos; 10b y 10c: patrones intermedios y 10d: patrones radiales (Kokornaczyk et al., 2018)

El valor de las zonas para el método

En esta metodología de cromatografía, no se persigue la separación total de los compuestos sino una parcial, la cual quedará determinada, como se vio, por el tipo de suelo y su salud. Según Kokornaczyk et al., (2016) en las CCP, por un lado, los colores se definen en relación a la distancia del centro, mientras que por el otro, dependen de los siguientes fenómenos: 1) movimiento del AgNO_3 , de sus productos por oxidación, etc., a lo largo del papel; 2) separación parcial de los compuestos presentes en la muestra al desplazarse por el papel e ir formando zonas de diferente concentración; y 3) reacciones que ocurren entre la muestra con el AgNO_3 y sus productos de oxidación. Esta secuencia de reacciones crea las zonas de las cromatografías. Mientras que la formación de los canales podría ser debido al pasaje de pequeñas partículas arrastradas por la corriente de agua. Una hipótesis posible es que en la medida que las sustancias de mayor tamaño de la muestra se van depositando en el papel, se va limitando el pasaje de la solución que siguen ingresando por el centro desde la caja de Petri. Las partículas más pequeñas arrastradas por las corrientes de agua abren camino entre los depósitos y forman los canales que se aprecian en las CCP.

En la tabla 6 se observan diferentes suelos que analizados mediante CCP muestran cómo va cambiando el desarrollo de los patrones y los colores.

Tabla 6. Tablas de puntuación para evaluaciones cualitativas de CCP según sus características (Pilon, 2017).

	Característica visual de importancia	Puntuación
Integración	Anillos concéntricos marcados y homogéneos (ausencia de integración)	1
	Algunos anillos (integración abrupta)	2
	Integración clara de las zonas y patrones	3
	Integración gradual	4
	Integración difusa y patrones que se entrelazan	5

	Característica visual de importancia	Puntuación
Plumas	Ausencia o apenas vestigios de plumas	1
	Apenas líneas radiales	2
	Líneas radiales a plumas estrechas o poco desarrolladas	3
	Plumas cubriendo todo el croma	4
	Plumas radiales prominentes, en alta densidad y bien desarrolladas	5

	Característica visual de importancia	Puntuación
Picos	Ausencia de picos ligados a las plumas	1
	Picos puntiagudos	2
	Puntiagudos con ciertas derivaciones	3
	Algunos picos se abren al final y forman manchas	4
	Muchos picos que originan manchas en la zona externa	5

	Característica visual de importancia	Puntuación
Color	Homogéneo; oscuro y negro, coloraciones borrosas y poco intensas	1
	Color gris ceniza a marrón	2
	Color de la tonalidad de los beige.	3
	Coloraciones claras	4
	Amarillos, cremas, anaranjados, dorados; intensos y heterogéneos	5

El 1 y el color rojo representan las valoraciones más bajas mientras que el 5 y el verde las más altas. Indicador tipo semáforo para facilitar su comprensión.

Tabla 7. Diagnóstico de la Cromatografía Circular de Pfeiffer según zona y parámetro medido en la determinación. Ford et al., (2019).

Característica	Parámetro medido	Qué representa
Zona Central (ZC)	Radio de la zona central (mm)	Los patrones de esta zona muestran la presencia de los minerales. Éstos, serían las sustancias más pesadas presentes en la solución de suelo que ingresa al papel, desplazándose poca distancia desde el centro.
Zona Media (ZM)	Amplitud de la zona media (mm)	Esta zona indicaría la presencia de materia orgánica del suelo y proteínas.
Zona Externa (ZE)	Amplitud de la zona externa (mm)	Las coloraciones de la zona indicarían presencia de nutrientes, actividad enzimática. Un rasgo característico de su buen desarrollo son las nubes al final de los picos.
Radio Total	Radio total (mm)	
Canales	Puntuación de 1 a 5 (ausente y bien desarrollado, respectivamente)	Mayor número y buen desarrollo de canales indicaría mayor presencia de materia orgánica y nutrientes en la muestra. Los canales que se extienden a lo largo del

		croma indicarían la integración/agregación (complejidad) de las sustancias del suelo.
Número (n) de canales	Cantidad de canales por cuadrante	
Picos	Ídem puntuación de canales	El mayor número de picos indicaría mayor presencia de MO y nutrientes en la muestra. Picos definidos y bien desarrollados indicarían un suelo saludable.
Número (n) de Picos	Ídem cantidad de canales	
Color	Intensidad del color. De 1 a 5 (borroso/débil e intenso, respectivamente)	Colores en la tonalidad de los rojos, anaranjados, dorados, crema indicarían suelos saludables. Colores oscuros como grises, azules o marrones indican suelos con menor actividad biológica.
Anillos	Número de anillos concéntricos	La fuerte presencia de anillos indica la escasa integración de las sustancias de la muestra.

Algunos resultados de las investigaciones realizadas con base en las CCP

Trabajos realizados en climas tropicales o sub-tropicales

Uno de los grandes desafíos es conseguir integrar un conjunto de análisis que permitan diagnosticar el estado de salud de los suelos a partir de índices que sean significativos y que permitan correlacionar los diferentes objetivos de productividad, medio ambientales, de salud y bienestar humano. Las CCP podrían ser útiles para formar parte de este conjunto de herramientas para generar los índices adecuados (Granatstein & Bezdicek, 1992).

En Brasil, Pires Bezerra (2018) evaluó diferentes suelos y usos a partir de CCP y análisis de laboratorio tradicionales como materia orgánica, densidad aparente, porosidad, pH, nitrógeno, fósforo disponible, cationes, etc. A partir de las puntuaciones de las diferentes CCP y la comparación con los resultados químico-físicos, encontró que había coherencia entre los diagnósticos (se compararon los diagnósticos de los suelos). La autora sugiere que las CCP arrojan resultados que apoyan los análisis químico-físicos y que este método cualitativo podría ser de utilidad para el apoyo de los métodos cuantitativos tradicionales para evaluar los suelos.

Melo (2020) encontró correlación positiva entre los resultados obtenidos mediante las CCP y los análisis cuantitativos químicos y físicos tradicionales en suelos del nordeste Brasileño (Paraíba). Se evaluaron fósforo, potasio, calcio, magnesio, carbono orgánico y densidad aparente, entre otros. Las cromatografías realizadas sobre los mismos suelos se evaluaron mediante un sistema de puntuación que se realizó según las diferentes zonas y características de las CCP citadas como relevantes por los autores de referencia Restrepo Rivera y Pinheiro (integración de zonas, coloración, por ejemplo). Estudió las correlaciones existentes entre las CCP y diferentes análisis tradicionales del suelo mediante un análisis de regresión logística, obteniendo correlaciones significativas de varios atributos físicos y químicos con las CCP. A partir del análisis de las diferentes zonas de las CCP pudo determinar por ejemplo, que había correlación positiva tanto del fósforo, como de la textura del suelo, con la Zona Central de la cromatografía. Mientras que para la Zona Interna se obtuvo correlación significativa con pH, Potasio, aluminio, calcio y magnesio.

Por otro lado, Graciano (2018) también encontró correlaciones entre indicadores físico-químicos y las zonas de las cromatografías, utilizando el análisis de correlación de spearman. La zona central tuvo correlación negativa con la resistencia a la penetración por debajo de los 20 cm así como en la media de los valores obtenidos en todas las profundidades, es decir, en el intervalo 0-40 cm. Esto daría sustento a la hipótesis de que la compactación del suelo se puede visualizar en la zona central de las cromatografías, apoyando lo que sugieren Restrepo y Pinheiro (autores de referencia). Por otro lado, la zona interna tuvo correlación positiva con el carbono orgánico total del suelo. Los patrones que se registraron en esta zona asociados al resultado fueron radiaciones bien definidas, coloración en la tonalidad de los marrones y la integración con las otras zonas.

La zona media tuvo correlación positiva con el carbono de la biomasa microbiana del suelo, lo cual demostraría la influencia de los microorganismos sobre la expresión de este segmento de las CCP. Los picos irregulares, coloración marrón y proporción con las demás zonas son los aspectos observados en los cromas para esta zona. Finalmente, la zona externa tuvo una correlación positiva (los valores más altos de correlación del estudio) con las enzimas fosfatasa ácida y arilsulfatasa, demostrando que la mayor presencia de este tipo de enzimas se podría ver reflejada en esta zona de las CCP. Las nubes y las tonalidades amarillentas reflejaron lo dicho (Graciano, 2018).

Graciano (2018) concluye que las CCP resultan en un método útil para realizar diagnósticos de calidad de suelo desde una perspectiva más integral, visualizando las relaciones entre lo químico lo físico y lo biológico.

Siqueira (2018) comparó en suelos del estado de San Pablo (Brasil) los resultados obtenidos a partir de CCP con los de un test de evaluación de salud de suelos mediante indicadores propuesto por Altieri & Nicholls (2002) y adaptados por Silva (2010). Los indicadores (entre ellos materia orgánica, infiltración, estructura) se generaron a partir de observaciones de campo mediante puntuaciones con una escala de valores definida por los autores, mientras que las cromatografías se puntuaron en base a una llave de interpretación.

Siqueira (2018), también realizó la evaluación estadística mediante un test de Kruskal Wallis para dilucidar si había consistencia en los resultados expresados por las CCP. Se compararon diferentes usos del suelo como sistema agroforestal, monte de lichia (*Litchi*

chinensis), bananal, pastizal, área forestal de vegetación nativa y un sistema de agricultura de cultivo de maíz con el paquete tecnológico de insumos convencional. La autora observó que había una importante variabilidad dentro de cada sistema cuando se consideraba la zona central, es decir, que esta zona no conseguía explicar diferencias entre los tratamientos, mientras que para las demás zonas (interna, intermedia y externa) se podía apreciar diferencias marcadas entre los diferentes usos del suelo. Al compararlos se pudo determinar que existía diferencia significativa entre las zonas intermedias y externas de las CCP de los sistemas de maíz convencional y el área forestal nativa. Esto demostraría que las áreas de referencia son claves para definir la valoración de los sistemas. Con el sistema de diagnóstico mediante cromatografías, se obtuvo el siguiente orden en relación a la salud del suelo: en orden decreciente área forestal nativa > bananal > lichia > pastura > sistema agroforestal > maíz convencional. Mientras que con los indicadores de Altieri & Nicholls (2002) se obtuvo el siguiente orden (decreciente en relación a la salud del suelo): sistema agroforestal > Bananal > pastura > mata ciliar > lichia > maíz convencional (Siqueira, 2018). La autora atribuyó las diferencias en los sistemas de evaluación a una falta de sensibilidad del indicador de “Estructura” propuesto por Altieri & Nicholls (2002), que generó una depresión de la valoración del suelo del área forestal nativa. También sugiere que si se hubieran considerado un mayor número de indicadores quizás los resultados hubieran sido más consistentes. La coincidencia de los sistemas de evaluación estuvo en que los dos sistemas tuvieron al bananal en el segundo lugar y al maíz convencional en el último. Además, el mismo trabajo menciona que las diferencias más sutiles entre los suelos, que podrían ser detectadas por métodos cuantitativos, son difíciles de observar, o más bien de evaluar en las CCP. Esto pone en duda la capacidad de las CCP para detectar pequeños cambios. Y conduce a la necesidad de trabajar en el “afinado” de los métodos de interpretación. La autora sostiene que la llave (clave) de interpretación fue una herramienta muy importante para lograr una mejor calidad y facilidad de interpretación.

La CCP, entonces, se muestra como una metodología integral que logra analizar en simultáneo muchas propiedades del suelo. Esto tiene como desventaja la dificultad en la interpretación y la incapacidad de generar datos específicos y cuantitativos en relación a un factor (por ejemplo materia orgánica), sin embargo, entrega una visión general del

estado de salud del suelo, mostrando las interacciones entre lo químico, lo físico y lo biológico que otras mediciones no logran capturar (Siqueira, 2018).

Aguirre (2019), por su lado, comparó 3 suelos de áreas diferentes (bosque nativo, huerta y pasto del parque) encontrando que las características de color, dientes y diferenciación por zonas pueden indicar diferencias entre los sistemas evaluados mediante CCP. Al igual que otros trabajos, se elaboró un sistema de puntuación de las cromatografías basado en los conceptos propuestos por los autores de referencia (integración de zonas, coloración, formas particulares, etc). A partir del análisis estadístico de los resultados obtenidos por CCP se obtuvieron dos agrupamientos con diferencias significativas. Por un lado se ubicaron los sistemas pasto y bosque, mientras que por el otro el sistema huerta. Este último presentó valores inferiores de coloración y dientes en relación al pasto y al bosque, indicados por colores oscuros, menor número de dientes y escasa integración entre las zonas. Esta evaluación mediante CCP se condice con los resultados obtenidos con los métodos cuantitativos, que registraron por ejemplo mayores valores de densidad aparente y sodio para el sistema de hortalizas. La evaluación estadística generó la misma agrupación de sistemas, tanto para las CCP como para los métodos tradicionales de laboratorio. Al confrontar los resultados se podría observar una misma tendencia en los dos métodos de evaluación del suelo, lo que podría indicar que las CCP presentan cierta consistencia y pueden complementar/apoyar a los análisis físico-químicos tradicionales. Las CCP podrían considerarse entonces como una herramienta válida para realizar diagnósticos de suelos que complementarían los análisis tradicionales cuantitativos y tendrían la ventaja de arrojar una visión más integral o holística del suelo al integrar diversas características (Aguirre, 2019).

En el terreno de la práctica, las CCP se utilizan mayormente para la evaluación de los estados de maduración de compostajes. En esta línea, Kumar et al., (2014) registró los cambios que se producen en el compost mediante las cromatografías con diferencias muy evidentes a partir de la observación visual (Figura 11). Este trabajo contribuye con la generación de conocimiento en relación a cómo los diferentes tipos de sustancias otorgan diferentes cromatografías. En este caso se observa claramente cómo el proceso de oxidación y degradación de los sustratos iniciales se va registrando en los CCP sucesivos. De hecho, originariamente, Pfeiffer utilizaba las cromatografías para analizar los procesos de compostaje que realizaba en grandes escalas (Pfeiffer, 1984).

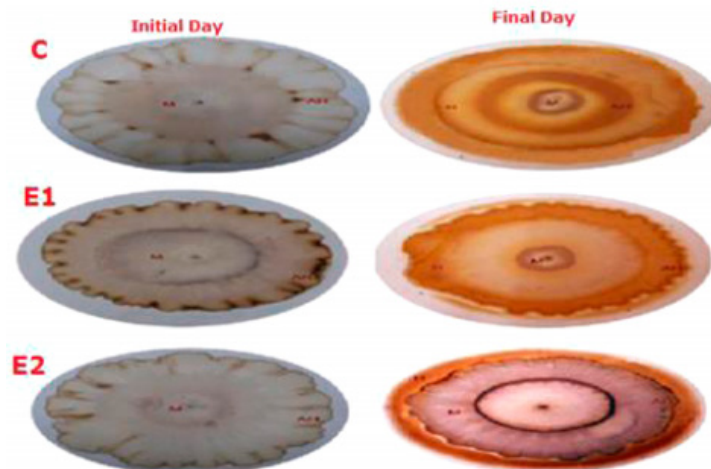


Figura 11. Cromatografías Circulares de Pfeiffer realizadas con residuos de harina compostada. Las imágenes de la izquierda pertenecen al estadio inicial mientras que las de la derecha corresponden al estadio del compost luego de 80 días. El tratamiento C corresponde a un compostaje de control, el E1 a un vermicompostaje y el E2 a un vermicompostaje con el agregado de *Azospirillum*. Extraído y adaptado de Kumar et al., (2014).

Trabajos realizados en clima templado

En Australia, Ford et al., (2019) evaluaron suelos mediante CCP y análisis de materia orgánica, actividad respiratoria microbiana, pH y salinidad, buscando establecer una relación entre la forma, el color y el patrón de estos cromas y la salud general del suelo. Se realizaron 361 cromatografías de suelos, con cuatro usos de la tierra: pastos (233 muestras de suelo), huertos (52 muestras), huertos (41 muestras) y suelo de vegetación remanente (35 muestras). Un resumen de sus resultados se presentan en la Tabla 8. Estos investigadores sugieren que las CCP se presentan como un método que puede ser de utilidad para el análisis de la salud del suelo en la zona sudoeste de Australia. Los

canales, picos y la coloración son los parámetros que serían más útiles como herramienta para la evaluación de la salud de los suelos.

Según Ford et al., (2019) observaron en su estudio, los resultados de las CCP son fuertemente dependientes del contexto, es decir, del tipo y uso del suelo. En general, las respuestas de las características analizadas en las CCP no fueron consistentes con las variables de suelo de laboratorio.

Algunas correlaciones incluso se mostraron en sentido opuesto a lo citado por los autores de referencia y por Kokornazcyk et al., (2016) como el carbono orgánico total (COT). Se encontró que la correlación entre los valores de coloración, picos y canales con los niveles de COT eran negativos, es decir, en la medida que este último aumentaba en los suelos, se apreciaban CCP con menor definición de los canales y los picos así como con coloraciones más débiles. Es importante tener en consideración para este resultado específico que el 75% de los suelos estudiados en este experimento tenían niveles de COT superiores a 3,9%, es decir, altos contenidos de materia orgánica. Y las diferencias significativas para los parámetros de las CCP en relación a COT se dieron sólo en la comparación entre los niveles alto y muy alto de carbono orgánico (en pasturas y huertas).

Restrepo Rivera y Pinheiro (2011) indican que para los suelos con altos niveles de carbono es necesario aumentar la concentración de álcali en la muestra de suelo para solubilizar más las sustancias orgánicas. Esto debería ser mejor estudiado, ya que de cumplirse que frente a un cierto umbral de COT los patrones de las CCP cambian, las metodologías tendrán que ajustarse.

Tabla 8: Resumen de las características del cromatograma capaces de detectar cambios en las variables de salud del suelo de los diferentes usos del suelo. Las signos positivos indican patrones significativos y / o fuertes, mientras que los signos ~ indican relaciones débiles o no significativas. Traducido y adaptado de Ford et al., (2019).

CE	pH	COT	CO2
----	----	-----	-----

	P	H	J	V	P	H	J	V	P	H	J	V	P	H	J	V
Radio total					+	+	~									
Zona Central (ZC)			~		~	+										
Zona Media (ZM)					~		~		~	~						
Zona Externa (ZE)				~	+				~	+			~			
ZM+ZE							~									
ZC/ZM+ZE	~		~													
Número de Canales		~		~	~	+	~		~	+		~				
Número de Picos	~	~		~	+				~	+		~				
Canales		~	+	~					+	~		~				
Picos	~		~	+	+				+	~		~				
Color	~		~	~	~				+	~						
Número de Anillos	+															

P: pastura; H: huerta; J: Jardín; V: vegetación remanente.

CE: conductividad eléctrica. COT: carbono orgánico total. CO₂: dióxido de carbono.

En Italia, Kokornaczyk et al., (2016) evaluaron las diferentes zonas y patrones de las cromatografías, con puntuaciones sobre los mismos hechos por evaluadores expertos y a su vez por análisis computarizado de la textura. Las evaluaciones se realizaron sobre análisis de 16 suelos de diferentes lugares, manejos (convencional, orgánico, biodinámico) y usos (olivos, trigo, etc.).

En primera medida, se analizó la coherencia de los resultados arrojados por las cromatografías donde, por un lado, mediante pruebas estadísticas, evaluaron la consistencia de los resultados a partir de las correlaciones entre los parámetros medidos. Mientras que por el otro analizan la correlación existente entre las evaluaciones mediante

CCP y los análisis químicos. Las CCP fueron evaluadas mediante 3 criterios diferentes: 1) medición de la extensión de las zonas mediante regla, 2) sistema de puntuación sobre las características del croma como anillos concéntricos, patrones radiales, colores (realizado por evaluadores expertos) y 3) análisis computarizado de la textura de la zona media de los cromas.

En lo que respecta a las características particulares de las CCP los autores pudieron observar dos grupos bien diferenciados a partir de su estudio:

- Por un lado los cromas que poseen formas fuertemente concéntricas, formando anillos ubicados en la zona central y la media. Estos patrones además se ven acompañados en general de coloraciones borrosas y de una zona externa fina poco visible rodeada por un borde liso.
- Por el otro lado, se expresaban fuertemente los patrones radiales, donde los canales empezaban en general desde la zona media (pero incluso en ciertos casos desde la zona central) y llegaban hasta los bordes de los cromas. Con la finalización de los canales en la zona externa se formaban picos que en muchos casos se encontraban en conjunto con nubes coloreadas sobre el borde exterior de la zona externa. En general este tipo de patrón presentaba coloraciones intensas.

Estos dos grupos se encontraban relacionados inversamente, pudiéndose resumir en que cuanto más fuertes sean las características concéntricas, más pequeñas y más débiles serán las radiales, y viceversa, como se observa en la figura 10.

Las muestras de suelo se diferenciaron principalmente a partir de la amplitud de la zona externa y del grado de desarrollo de los canales, mientras que la amplitud de la zona media, la longitud de los radios y la textura tuvieron valores bajos. Esto demostraría que los factores que tienen potencial para diferenciar las muestras son los primeros.

Kokornaczyk et al., (2016) encontraron fuertes correlaciones entre los parámetros analizados en las CCP, como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9: Correlaciones entre los parámetros derivados de los diferentes patrones de las CCP (Kokornaczyk et al., 2016).

	Visual evaluation				Texture analysis
	Channels	Spikes	Color	Concentric rings	Entropy
<i>Zone measurements</i>					
Total radius	-0.63**	-0.74 **	-0.70 **	0.77 **	-0.79 **
Central zone	-0.83 ***	-0.86 ***	-0.77 **	0.92 ***	-0.81 ***
Middle zone	-0.14 ns	-0.24 ns	-0.39 ns	0.22 ns	-0.25 ns
Outer zone	0.83 ***	0.85 ***	0.86 ***	-0.91 ***	0.76 **
<i>Texture analysis</i>					
Entropy	0.74**	0.67**	0.72**	-0.81***	–

Legend: ns = $p > 0.05$; * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$.

Channels: canales; Spikes; picos; Concentric rings: anillos concéntricos.

Los autores mencionados anteriormente encontraron que todos los parámetros que se midieron mediante observación visual presentaron fuertes correlaciones. Los anillos concéntricos se relacionaron negativamente con los canales, picos e intensidad de coloración ($r = -0,9$; $-0,91$; $-0,93$ respectivamente con $p < 0,0001$). Los canales, picos y la intensidad de la coloración presentaron fuertes correlaciones positivas entre ellos (r desde $0,91$ a $0,97$ para $p < 0,0001$). Por otro lado, los canales, los picos y la coloración también se correlacionaron positivamente con la zona externa y la textura, mientras que lo hicieron de forma negativa con el radio total y el radio de la zona central. En consonancia con lo anterior, los anillos concéntricos crearon correlaciones negativas significativas con la amplitud de la zona externa y positivas con el radio total y de la zona central.

Kokornaczyk et al., (2016) también realizaron análisis químicos y de textura, observando importantes diferencias en los niveles de materia orgánica, nitrógeno, cantidades de arcilla, limo y arena. Sólo no se observaron diferencias de pH. En la Tabla 10 se observan las correlaciones existentes entre los parámetros medidos en las CCP y los análisis químicos. Los autores observaron que existía correlación significativa entre los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo y bromo asimilables con los resultados obtenidos del análisis de las cromatografías.

Tabla 10: Correlación (Valores R de Pearson) entre los patrones evaluados de las CCP y los análisis químicos tradicionales (Kokornaczyk et al., 2016)

	O. M.	N tot	Ass. P	Ass. Br	Sand	Clay	Silt	pH
<i>Zone measurements</i>								
Total radius	-0.68**	-0.63**	-0.72**	-0.57*	-0.32	0.32	0.20	0.26
Central zone	-0.88***	-0.69**	-0.87***	-0.81***	-0.40	0.25	0.39	0.44
Middle zone	-0.23	-0.51*	0.03	-0.33	-0.52*	0.54*	0.31	-0.12
Outer zone	0.96***	0.86***	0.72**	0.97***	0.68**	-0.47	-0.62*	-0.36
<i>Visual analysis</i>								
Spikes	0.85***	0.73**	0.88***	0.82***	0.45	-0.42	-0.31	-0.64**
Channels	0.86***	0.71**	0.89***	0.83***	0.44	-0.34	-0.37	-0.67**
Color	0.84***	0.79**	0.79**	0.82***	0.52*	-0.43	-0.42	-0.52*
Concentric rings	-0.92***	-0.81***	-0.86	-0.85***	-0.50*	0.40	0.40	0.45
<i>Texture analysis</i>								
Entropy	0.75**	0.71**	0.81***	0.69**	0.30	-0.30	-0.19	-0.56*

Legend: O. M. – organic matter; N tot – total nitrogen; Ass. – assimilable; ns = $p > 0.05$; * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$.

O.M: materia orgánica; Ass P: fósforo asimilable; Ass Br: bromo asimilable; Sand: fracción arena; Clay; fracción arcilla; Silt: fracción limo.

Como se desprende de la Tabla 10, el contenido de MO, nitrógeno total, fosforo asimilable, bromo asimilable y arena presentaron correlaciones positivas con la amplitud de la zona externa, con las características radiales (canales y picos), intensidad de color y con la textura. Mientras que estos mismos indicadores químico-físicos presentaron correlación negativa con el radio total y radio de la zona central así como con el patrón de anillos concéntricos. El pH, limo y arcilla correlacionaron negativamente con la amplitud de la zona externa, con los canales, picos, intensidad de color y textura, mientras que tuvieron correlación positiva con radio total y de la zona central y con el patrón anillos concéntricos. La correlación entre los parámetros evaluados de las CCP y la capacidad de intercambio catiónico, el calcio y el magnesio intercambiable fueron bajas y no significativas. Estos resultados sugieren que los patrones generados por las CCP podrían brindar una visión general y confiable sobre el estado general de salud del suelo (Kokornaczyk et al., 2016).

En este experimento, a su vez, se pudieron apreciar diferencias significativas entre las muestras de los diferentes usos del suelo a partir de los análisis cromatográficos. Hubo diferencias entre los tipos de uso olivos, viñedos, campos de alfalfa, legumbres así como para diferentes tipos de granos. Los canales fueron el único parámetro de las CCP que logró explicar las diferencias significativas entre el uso/manejo de los suelos. Esto

indicaría que se trata de uno de los parámetros más sensibles del método de evaluación por CCP. Es importante considerar que en este experimento el número de muestras de cada uso del suelo fue relativamente bajo (ya que el objetivo del trabajo estaba enfocado a la relación de los resultados CCP vs los químicos) por lo que en otras oportunidades debería evaluarse con un mayor número de repeticiones (n). En conclusión, los hallazgos del trabajo permitirían resumir que existe una relación inversa entre los patrones concéntricos y los radiales, lo cual permite dividir de forma general dos grupos de parámetros a identificar:

- 1) Los relacionados a los patrones concéntricos como la longitud del radio total y del de la zona central, el número de anillos concéntricos.
- 2) Parámetros relacionados a los patrones radiales como la amplitud de la zona externa, los canales, los picos, la intensidad del color y la textura.

Los parámetros de cada grupo se correlacionaron positivamente entre sí mientras que lo hicieron de forma negativa con el otro grupo. A partir de las correlaciones encontradas por estos investigadores entre las CCP y los análisis químico-físicos se puede decir que:

- Los patrones radiales estarían correlacionados positivamente con los mayores niveles de MO, nitrógeno total, fósforo, bromo y arena (el parámetro arena estaría vinculado a la menor compactación del suelo en este tipo de suelos y con el histórico de manejo/uso).
- Los patrones de anillos concéntricos estarían relacionados con la pobre calidad del suelo, determinado por algunos parámetros como bajos contenidos de MO, fósforo, bromo y altos contenidos de arcilla y limo (relacionados a problemas de compactación).

Los resultados de este estudio permitirían decir que los patrones radiales son un signo de la buena calidad de un suelo mientras que los patrones concéntricos indican lo contrario. Esto está en línea como lo plantean los autores de referencia (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011). A su vez, las correlaciones encontradas, demostrarían que la sensibilidad de las CCP permite identificar ciertas características de los suelos asociados a su calidad. También se podría decir que los criterios de evaluación utilizados en este trabajo tienen validez

En relación a las mediciones de las zonas, Kokornaczyk et al., (2016) pudieron apreciar fuertes correlaciones de la amplitud de la zona externa y el radio de la zona central con los análisis químicos. A diferencia de la zona externa, el parámetro de amplitud de la zona media no tuvo correlación significativa con ningún parámetro analizado en este trabajo.

Entonces, según Kokornaczyk et al., (2016), a partir de los resultados se podría decir que la diferenciación de patrones debería basarse principalmente en las características radiales y concéntricas. Esto sería importante ya que mientras los patrones concéntricos serían característicos de un proceso de separación tradicional de una cromatografía donde se separan los compuestos (característica “pasiva”), el caso de los patrones radiales, la separación de los compuestos sucede parcialmente, demostrando diferentes grados de interacción entre los componentes de la muestra de suelo. Esto último sería un indicador de los procesos de auto-organización que suceden en el suelo, como viene siendo reportado por diferentes trabajos. Los patrones radiales expresan en definitiva, la complejidad del suelo que se ve representada en la dificultad de la muestra para separarse a pesar de los procesos de dispersión aplicados por la técnica (sodio, agitación, filtrado del papel, etc.).

Las correlaciones que se encontraron en este estudio entre la materia orgánica y los canales podrían confirmar la hipótesis de que los compuestos de materia orgánica que ingresan al papel funcionan como limitadores de la circulación de las muestras, estimulando la formación de canales. Esto a su vez es acompañado por la formación de picos y nubes coloreadas sobre la zona externa al finalizar el canal, lo cual indicaría la presencia de sustancias simples que llegaron hasta los bordes.

Si se considera que el patrón radial tiene una muy alta correlación positiva con la amplitud de la zona externa, la zona externa en su totalidad podría ser considerada como una zona de la cromatografía donde llegan todas las sustancias que pasaron por los canales (como si fuera la zona de desagote) como consecuencia de la deposición de materiales orgánicos bloqueadores de las zonas anteriores. Esta dinámica se podría confirmar considerando la significativa correlación negativa que se observó entre el radio de la zona central y la amplitud de la zona externa (Kokornaczyk et al., 2016).

Los resultados del trabajo sugieren que las CCP podrían ser consideradas como una fuente de información confiable sobre el estado del suelo. Los patrones radiales y la

intensidad de la coloración podrían resumirse como indicadores de la buena salud del suelo mientras los patrones concéntricos y la coloración borrosa indicarían suelos no saludables (Kokornaczyk et al., 2016).

DISCUSIÓN

En la última década, la ciencia del suelo está atravesando un cambio de paradigma. Como se representa en la Figura 11, es evidente la necesidad de dejar atrás los abordajes reduccionistas, focalizados en pocos factores y orientados a la productividad. El nuevo paradigma es holístico y considera la multifuncionalidad, los servicios ecosistémicos, aspectos claves como la resistencia y resiliencia de los sistemas vivos. Los diseños ya no son exclusividad de los científicos y expertos, sino que en este nuevo paradigma se busca involucrar a todas las partes, dando un fuerte protagonismo a los agricultores (Buneman et al., 2018)

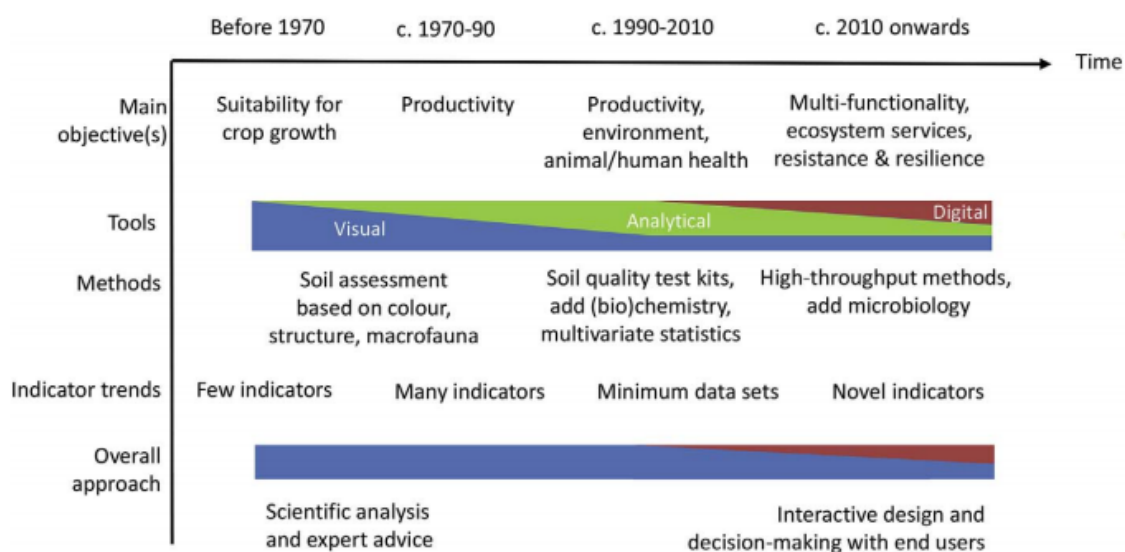


Figura 11: Principales objetivos, herramientas y abordajes de la evaluación de la calidad del suelo a lo largo de la historia (Buneman et al., 2018)

Algunos temas como la importancia del carbono y la biodiversidad para la salud no sólo del suelo sino del sistema planetario completo se han destacado considerablemente.

Lal (2004) destaca que el suelo es el más grande reservorio de carbono de la superficie terrestre con un pool que representa 2500 giga-toneladas (Gt), de las cuales 1550 Gt representan al carbono orgánico del suelo y unos 950 Gt al carbono inorgánico del suelo. Esto implica que el suelo contiene 3,3 veces más carbono que la atmósfera (760 Gt) y 4.5 veces más que el pool de la biosfera (560 GT). En la distribución y la composición de la materia orgánica del suelo a lo largo del planeta se puede apreciar valiosas informaciones en relación al clima, la vegetación, el material parental así como de la dinámica de los procesos de cada lugar. La materia orgánica es en este sentido, un banco de información muy importante (Paul, E. 2016).

El suelo es un sistema con un nivel de biodiversidad que supera ampliamente lo existente en la superficie. Esta biodiversidad es un pre-requisito para mantener la estabilidad y brindar servicios ecosistémicos. Lejos de estar aislado de los demás sistemas, la riqueza y la estructura de la biodiversidad del suelo está estrechamente ligada a la biodiversidad vegetal, dependiendo de ésta en una relación de reciprocidad, es decir, hay una dependencia mutua o interdependencia y se retroalimentan. La biota del suelo es clave en los procesos de ciclado y retención de nutrientes así como en la formación, renovación y almacenamiento de carbono en el suelo (Thiele-Bruhn et al 2012).

En el ambiente del suelo, probablemente, se desarrollan las más complejas comunidades biológicas. Los organismos vivos del suelo son extremadamente diversos y son responsables de sustentar un amplio rango de servicios ecosistémicos que son esenciales para la manutención de los eco y agroecosistemas. El ciclado de nutrientes, la fijación de materia orgánica y la generación de la estructura así como la salud de las plantas así como su productividad, son algunos de los procesos que están fuertemente vinculados con la biodiversidad del suelo. Por estos motivos, resulta necesario reconocer la importancia de la diversidad biológica y funcional del suelo para conservarla y, en la medida de lo posible, mejorarla (Barrios, 2007).

Debido a este nuevo paradigma, el número de publicaciones que se dedican al estudio del suelo haciendo foco en estos temas, y a proponer alternativas para su abordaje, es cada

vez es mayor. En esta línea, Birgé et al., (2016) sugieren que: *“Promoviendo la inclusión de los monitoreos de variables mediante el ciclo de manejo adaptativo, los manejadores o administradores de agroecosistemas pueden promover los servicios ecosistémicos del suelo como la producción de alimentos, fibras, biodiversidad, purificación de agua, secuestro de carbono, regulación hidrológica y atmosférica, control de erosión, de enfermedades y plagas[.] Los manejos inadecuados que buscan la producción intensiva de sólo algunos servicios ecosistémicos (productividad por ejemplo) pueden conducir a pérdidas persistentes y no lineales de servicios ecosistémicos del suelo [..] Mientras que, reduciendo la incertidumbre acerca de lo que sucede en el suelo, el manejo adaptativo puede apuntarse hacia objetivos relacionados a la biodiversidad evitando sobrepasar los umbrales críticos de un planeta que cambia rápidamente”*.

Es por ello que, dentro de las herramientas que se podrían utilizar para enriquecer el conocimiento acerca de la salud del suelo, están las Cromatografías Circular de Pfeiffer (CCP).

A partir de la revisión realizada se pudo constatar que existen diversos trabajos que han analizado los suelos con la técnica de las CCP y que a su vez las han comparados con las metodologías tradicionales.

La pregunta que se puede observar de forma generalizada en los trabajos es la referida a la capacidad de las CCP de entregar un diagnóstico coherente con el estado de salud de los diferentes suelos. En este sentido, las diferencias significativas aparecieron de forma consistente en el análisis de suelos contrastantes, es decir, a partir de las áreas de referencia, como podría ser un suelo marcadamente degradado y uno saludable, en buen estado de conservación formando parte, por ejemplo, de un área de vegetación nativa. Las diferencias que arrojan las CCP para estos casos en general son significativas. En los casos intermedios se aprecian variaciones que aún no logran expresar una consistencia, es decir, no sería posible realizar una sistematización en relación a la gradualidad de los cambios en los suelos mediante las CCP. Por ejemplo, respecto a las diferencias a lo largo del tiempo en el suelo, en general, los trabajos de análisis de cromatográficos en distintos momentos de un mismo lugar o suelo, son escasos. Pires Bezerra (2018) realizó las CCP en un mismo suelo en tres instancias diferentes, en un plazo de 18 meses, y no observó diferencias en las cromatografías. Esto sería una de las debilidades de la técnica

a partir de lo que se sabe desde el punto de vista académico hasta el momento, y es lo que justamente estimula a la ampliación de las investigaciones sobre el tema.

Sin embargo, se puede plantear el interrogante: ¿Son las CCP las que no logran detectar los cambios graduales o son las personas y/o los sistemas de interpretación de las mismas los que no lo detectan en los patrones formas y colores de las mismas? Es importante no sobreestimar la capacidad de interpretación de los evaluadores de cromas. También debe considerarse que aún no se ha desarrollado una comprensión profunda del método, es decir, aún no se encuentran publicados trabajos que expliquen en detalle todos los fundamentos de los procesos de formación de las imágenes en las CCP ni cuáles son los motivos que los originan desde la perspectiva del suelo. Por ejemplo, se hipotetiza que la presencia de anillos concéntricos estaría relacionada a la menor agregación del suelo, pero aún resta profundizar considerablemente para tener mayor certidumbre sobre este aspecto.

Ford et al., (2019) destacan que mientras que los procedimientos metodológicos para obtener una CCP están bastante bien desarrollados y estandarizados, pero hace referencia que los criterios de evaluación de los CCP son aún muy limitados.

A la hora de comparar las CCP con los métodos tradicionales de análisis químicos y físicos buscando correlaciones, aparecieron resultados diversos, en ciertos casos coincidentes y en otros contrastantes. Analizando el conjunto de los resultados no se podría decir que las CCP presentan correlaciones consistentes con los análisis químicos y físicos tradicionales. Este genera una serie de interrogantes en relación a la pertinencia del método.

Si se supone que las CCP podrían expresar el estado de salud del suelo, cómo se explicaría el hecho de que no se obtuvieran, en todos los trabajos, correlaciones positivas con indicadores claves como materia orgánica, biomasa o respiración microbiana, por ejemplo. Está claro que existe la posibilidad de que las CCP pueden no ser un método consistente para la evaluación del suelo. Pero sin embargo, es importante ampliar el abordaje, considerando también que es posible que los indicadores clásicos no sean suficientes para describir la salud del suelo en forma integral. De hecho, los trabajos presentados sobre la evaluación de la salud del suelo enfatizan en la necesidad de considerar una serie considerable de indicadores para lograr formar un índice global que

los integre. ¿Un análisis químico da un panorama detallado del estado de salud del suelo? Según lo presentado, la respuesta esa pregunta es un no.

En esta línea de razonamiento, pretender que las CCP correlacionen fuertemente con indicadores aislados sería exigirle a un método algo para lo cual no fue diseñado. Según los autores de referencia, las CCP darían una imagen global del estado del suelo, y esto entendido en un contexto más holístico, significaría en principio asumir que en ciertos casos, para ver o ampliar más la mirada y ganar claridad, a veces es necesario perder precisión. Considerando la propuesta de Capra (1998) significaría el cambio de paradigma en el que se pasa de las partes al todo, de los objetos a las relaciones, de la cantidad a la calidad de la estructura a los procesos y del individuo a las comunidades.

Probablemente el sesgo hacia las partes y el estudio compartimentalizado, son algunos de los motivos por los cuales hoy día la ciencia del suelo aún presenta un considerable desconocimiento de los aspectos microbiológicos del suelo, por ejemplo.

La CCP es una fotografía de un momento dado del suelo, y su interpretación no puede ser hecha de forma fragmentada, sino que requiere que se considere al suelo como un sistema vivo, integrado al agro o ecosistema, lo cual va en línea con la ruptura de la lógica de la corrección o fertilización de suelos en base a aspectos químicos aislados por ejemplo (Pilon et al., 2018).

Es necesario continuar evaluando otros patrones presentes en las cromatografías para poder dilucidar qué otros indicadores podrían mostrar el estado de salud del suelo. Las evaluaciones visuales de los patrones tuvieron correlaciones con los análisis químico-físicos de mayor magnitud que las que se observaron para la el análisis de la textura computarizada, sugiriendo que la evaluación visual tuvo mayor sensibilidad en este estudio (Kokornaczyk et al., 2016). Esto coincide con lo que los autores de referencia proponen, es decir, la valorización de la interpretación visual y el foco en lo cualitativo. Justamente en este trabajo se puede apreciar, que las mediciones cuantitativas de las CCP resultaron menos útiles para evaluar que la valoración visual.

Los resultados obtenidos por (Kokornaczyk et al., (2016) tienen coherencia entre con los indicadores reportados como positivos y negativos por los autores de referencia (Restrepo Rivera y Pinheiro, 2011). También se observó coherencia en lo resultados y se coincidió en que los patrones servirían como referencia confiable.

Con respecto a la pertinencia del método desde un punto de vista científico, en base a lo revisado sobre las diferentes reacciones de los compuestos orgánicos con el hidróxido de sodio y con la plata, sumado a la separación de las sustancias que se logra con la cromatografía circular en papel, se puede afirmar que existe un sustento científico-metodológico en la propuesta de las CCP.

Esto significaría que, analizando paso por paso la metodología propuesta por Pfeiffer, se puede dilucidar que mediante la reacción con hidróxido de sodio, las agitaciones y el posterior reposo se logra que ingresen al papel un conjunto particular de sustancias del suelo que podrían representarse como sustancias coloidales (partículas de arcilla y limos finos, materia orgánica en general, sustancias arcillo-húmicas u órgano-minerales, etc.) así como sustancias simples que permanecen en solución (azúcares, iones, proteínas, etc.). Esto determina en cierta medida un cierto tipo de sustancias que serán analizadas mediante la separación parcial y la tinción con plata en el papel.

En la segunda fase, los procesos de separación en cromatografía de papel circular y las tinciones con plata son bien conocidas dentro de las metodologías clásicas para la detección e identificación de proteínas o ciertas sustancias orgánicas.

Por ejemplo, se podría mencionar que la formación de complejos entre la plata y las proteínas reduce marcadamente el potencial de reducción de la plata, es decir, se torna mucho menos susceptible a la reducción (los complejos de diamina de plata y los complejos formados en medios alcalinos como el AgOH por ejemplo) (Rabilloud, 1990). O que en algunos casos, se sabe que la tinción se ve afectada por el nivel de organización de las sustancias, es decir, en la medida que hay mayor complejidad molecular, la tinción se dificulta por la barrera de la inter-fase física. La formación de la imagen también depende de un factor físico como la formación de centros de nucleación de plata reducida. En los procedimientos de electroforesis se agregan compuestos específicos mejoradores de imagen que se basan en este principio (centros de nucleación) (Merril, 1986).

Esta característica daría sustento a las propuestas de los autores de referencia, quienes sugieren que el nivel de organización del suelo es uno de los factores más determinantes de la imagen que se forma en las CCP. Bajo esta idea, los suelos que poseen una mayor agregación y un mayor nivel de complejidad e integración entre sus elementos, van a reaccionar de manera muy diferente a lo que lo realizaría un suelo desagregado, con baja

diversidad de compuestos orgánicos y bioquímicos (productos del metabolismo de la biota del suelo). Merrill (1986) cita las hipótesis relacionadas a la importancia de considerar los procesos de quelación que suceden entre los ácidos orgánicos y sustancias similares con la plata, focalizando en cómo este tipo de reacciones puede cambiar el resultado del revelado. En la técnica de la CCP esta particularidad podría ser un factor de importancia ya que puede tener incidencia sobre la reactividad de las sustancias que se trasladan por el papel y su lugar de deposición final. Kokornaczyk et al., (2016), a título de ejemplo y en línea con lo antedicho, decidieron implementar una medición de la textura de las CCP mediante un software, buscando evaluar justamente el nivel de dispersión de las partículas que ingresaron a la cromatografía, lo cual asumimos que deducen que sería resultado del grado de organización del suelo.

El hecho de que la separación en las CCP sea parcial representaría una de las principales limitantes a la hora de analizar la técnica desde una perspectiva que se oriente a resultados cuantitativos. Pero, justamente, la propuesta es la generación de un indicador cualitativo, y es por esto también (según entendemos) que se apunta a analizar la solución de suelo propuesta por Pfeiffer. No se quiere analizar las partes del suelo sino los procesos o las formas mediante las cuales éstas se integran.

Es evidente la necesidad de profundizar en la experimentación con CCP evaluando los procesos de formación de los patrones, las diferentes regiones de precipitación de los compuestos (suelo, nitrato de plata, hidróxido y los productos resultantes de las interacciones entre los anteriores) (Kokornaczyk et al., 2016).

En relación a los aspectos metodológicos es necesario profundizar en sus diferentes aspectos. Uno de ellos son las condiciones de impregnación y revelado. Por ejemplo, mientras que Ford et al., (2019) utilizaron condiciones controladas de humedad para la impregnación del papel, Kokornaczyk et al., (2016) realizaron análisis en diferentes días, evaluando así el efecto del día en este experimento, ya que se realizaron repeticiones en 3 días diferentes con la intención de evaluar su efecto. Tanto los factores relacionados a las muestras en sí mismas como el día de muestreo tuvieron efectos significativos para los resultados. En general, la influencia de las muestras fue mayor que la del día. En este experimento se observó una influencia significativa del día sobre el resultado de las CCP. Esto demuestra la necesidad de considerar las condiciones ambientales al momento de

realizarlas (temperatura, humedad, intensidad de luz durante el revelado, etc.) y sugiere que en la medida que se busque mayor exactitud del método se deberá aumentar el grado de control de las condiciones ambientales (Kokornaczyk et al., 2016).

Esto último pone en evidencia la importancia de tener en consideración a la hora de comparar CCP realizadas en diferentes lugares y condiciones. En principio las comparaciones entre CCP con mayor solidez se darían con las que fueron realizadas en las mismas condiciones. Estandarizar entonces las condiciones para su impregnación y revelado resultaría muy útil para la investigación académica y prácticamente inviable para la evaluación de campo por parte de agricultores. Para los últimos, lo que resultaría más consistente entonces, es comparar las CCP realizadas en simultáneo.

El método presenta una ventaja importante en lo que respecta a sus costos económicos en relación a los análisis convencionales de laboratorio (Pires Bezerra, 2018; Ford et al., 2019). Además Pires Bezerra (2018) destaca la simplicidad metodológica de la técnica para elaborar los CCP, ampliando así el abanico de posibilidades para realizarlos en más lugares (rompe la barrera de la necesidad de un laboratorio). Las CCP son análisis relativamente baratos y efectivos para poder obtener de forma rápida una visión general sobre el estado de salud del suelo, contribuyendo a dar una información que en principio podría substituir en parte a los análisis químicos pero que principalmente los complementa. Serviría especialmente para aquellos casos donde se quieren contrastar diferentes estados de fertilidad y no en aquellos donde se desean valores exactos sobre algún parámetro. El estudio revela la necesidad de realizar más experimentos para analizar otros parámetros, así como los procesos de formación de las zonas y patrones (Kokornaczyk et al., 2016).

La CCP logran integrar aspectos físicos, químicos y biológicos en un único análisis, contribuyendo a la generación de una visión global del suelo, en donde los agricultores consiguen apreciar la importancia de conocer el estado de salud de sus suelos. Esto significa un aporte significativo para la construcción de una percepción sistémica y holística de los agroecosistemas (Melo, 2020; Pires Bezerra, 2019). Las CCP además resultan ser mucho más atractivas para los agricultores ya que las imágenes “hablan por sí solas” si se cuenta con el conocimiento básico sobre interpretación de los cromas. Esto se presenta como una gran ventaja, sobre todo frente a la dificultad que generalmente

encuentran los agricultores para entender/interpretar los resultados los análisis químicos y físicos (Melo, 2019; Siqueira 2018; Pires Bezerra, 2018).

Sin embargo, desde otra perspectiva, cuando se pretende hacer un análisis minucioso y detallado de las CCP aparecen una serie de interrogantes que ponen en duda a quienes están interpretándolos. Como se dijo antes, aún no se contaría con suficiente experiencia para dilucidar todos los factores que determinan la estructura de una cromatografía. Restrepo Rivera & Pinheiro (2011), quienes son autores de referencia en el tema, afirman que un evaluador se torna experto luego de interpretar miles de CCP. Esta particularidad, demuestra que las cromatografías se presentan por un lado, como un análisis simple, de gran utilidad para lograr de forma sencilla una imagen del suelo que sirva como guía para los agricultores (en definitiva, podría decirse que es una foto del suelo), y por el otro, como una técnica analítica que expresa un resultado difícil de interpretar con alto grado de detalle, ya que implica evaluar formas, patrones, colores, niveles de integración y buscar en ello una justificación que permita explicar los procesos que lo originaron.

En términos generales, las CCP se mostrarían como un método que no sustituye los análisis convencionales sino que los complementan, es decir, no es capaz de arrojar resultados que sean equivalente a al contenido de carbono orgánico o los niveles de fósforo, pero sí es capaz de entregar en una imagen una perspectiva diferente sobre el suelo, integrando aspectos químicos, físicos y biológicos que permite evaluar la salud del suelo y enriquecer la visión, entendiéndolo como un sistema vivo acoplado a un paisaje (Melo, 2019).

CONSIDERACIONES FINALES

Las ciencias agropecuarias y las ciencias del suelo se encuentran frente a una serie de cambios profundos. Los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo del paradigma actual no sólo no han podido resolver los problemas estructurales sino que, en muchos casos, los han profundizado.

La evaluación de la salud de los suelos desde una perspectiva que se basa en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano aparece como un camino viable para

mejorar la comprensión de los sistemas complejos, los sistemas vivos; y por otro lado, se presenta como una oportunidad para re-valorizar los recursos, ya no sólo por su valor de uso sino por su valor intrínseco.

Las CCP se presentarían en este escenario como una herramienta válida para la evaluación de la salud de los suelos, dentro de un gran abanico de posibilidades/metodologías. Considerar a las cromatografías como un método de evaluación único y aislado de las otras evaluaciones implica caer en un reduccionismo propio del modelo que se critica en este trabajo. En el paradigma emergente, las CCP formarían parte de una serie de evaluaciones. Se podrían sumar a toda la batería de indicadores que se fueron mencionando durante este trabajo, bajo diferentes abordajes o metodologías.

Por último, la complejidad que presentan las CCP a la hora de la interpretación de sus resultados y la imposibilidad de utilizarlas como método cuantitativo, acabarían dando la oportunidad de comenzar a pensar/practicar la ciencia desde otra perspectiva. En otras palabras, sería un estímulo para cambiar los abordajes y comenzar a desarrollar una mirada más holística del mundo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- **Aguirre, Sonia E., Piraneque, Nelson V., & Díaz, Carlos J. 2019.** Valuation of soil state in dry tropical forest zone by analytical techniques and chromatograms. Información tecnológica, 30 (6), 337-350.
- **Arias, M. Enriqueta; Gonzalez-Perez, José A.; Gonzalez-Vila, Francisco J. y Ball, Andrew S. 2005.** La salud del suelo: un nuevo reto para microbiólogos y químicos. Int. Micobiol. Vol.8, n.1, pp.13-21. ISSN 1139-6709.
- **Bhaduri Dibarati, Tapan Jyoti Purakayastha, Pragati Pramanik, Ajoy Saha, Bibhash Chandra Verma, Mohammad Shahid, and Debasish Saha. 2020.** Capítulo 14: Indexing Methods of Soil Quality in Agro-Ecosystems: An Overview of Indian Soils and Beyond. A.

Rakshit et al. (eds.), Soil Analysis: Recent Trends and Applications. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020.

- **Barrios, E. 2007.** Soil biota, ecosystem services and land productivity. Ecological Economics. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.03.004

- **Bello Antonio, García Alvarez Avelino, Ibáñez Juan José. 2002.** Conference paper: El suelo en Agricultura Ecológica. Manejo de un ente vivo. Primer Congreso Iberoamericano de Agroecología y V Congreso de la SAE, At Gijón, España (16-21 de Septiembre de 2002). Volume: Vol, 1, 43-63

- **Bindraban, P. S., van der Velde, M., Ye, L., van den Berg, M., Materechera, S., Kiba, L. Tamene, K.V. Ragnarsdottir, R.E.E. Jongschaap, M. Hoogmoed, W.B. Hoogmoed, C.L. Beek, G.W.J. van Lynden. 2012.** Assessing the impact of soil degradation on food production. Current Opinion in Environmental Sustainability, 4(5), 478–488.

- **Brady NC and Weil RR. 2008.** The nature and properties of soils, 14th edn. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- **Burbano, H. 2017.** La calidad y salud del suelo influyen sobre la naturaleza y la sociedad. Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de Nariño Vol. XVIII. No. 1– 1er. Semestre 2017, Enero-Junio – Páginas 118-126

- **Burbano, H. 2016.** El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. Rev. Cienc. Agr. 33(2):117-124.

- **Burbano, H. 2010.** El suelo al servicio de la sociedad y su rol en el contexto de los cambios globales. Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de Nariño Vol. XI. No. 2 2do. Semestre 2010, páginas 53-62.

- **Capra, Fritjof. 1998.** La trama de la vida. Editorial Anagrama.

- **Capra, Fritjof & Luisi, Pier Luigi. 2014.** The Systems View of Life. A Unifying Vision. Cambridge University Press.

- **Chen, X., Jin, M., Xu, Y., Chu, W., Olk, D. C., Hu, J., Thompson, M. L. 2019.** Potential Alterations in the Chemical Structure of Soil Organic Matter Components during Sodium Hydroxide Extraction. Journal of Environment Quality.

- **Chen, Z., Campbell, P. G. C., & Fortin, C. 2012.** Silver Binding by Humic Acid as Determined by Equilibrium Ion-Exchange and Dialysis. *The Journal of Physical Chemistry A*, 116(25), 6532–6539.
- **Chevallet, M., Luche, S., & Rabilloud, T. 2006.** Silver staining of proteins in polyacrylamide gels. *Nature Protocols*, 1(4), 1852–1858.
- **De Schutter, O. 2011.** Agroecology and the right to food. Report presented at the 16th Session of the United Nations Human Rights Council [A/HRC/16/49] March 8, 2011.
- **Falconí, F. & Burbano, R. 2004.** Instrumentos económicos para la gestión ambiental: decisiones monocriteriales versus decisiones multicriteriales. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 1, 11-20
- **FAO. 2015.** Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. 4 p. <http://www.fao.org/3/a-i4405s.pdf>
- FAO. 2020.** Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar. Disponible en: Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar. Último acceso: septiembre de 2020.
- **Feller, C. 2015.** Soil connects nature and culture. IUSS Division 4. IUSS, Vienna, Austria. *Bulletin of the International Union of Soil Sciences* 127:30 - 31.
- **Ford, B., Cook, B., Tunbridge, D., & Tilbrook, P. 2019.** Using paper chromatography for assessing soil health in southwestern Australia. Centre of Excellence in Natural Resource Management, University of Western Australia.
- **Gliessman, S. (2013)** Agroecology: Growing the Roots of Resistance, *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37:1, 19-31, DOI: 10.1080/10440046.2012.736927
- **Gliessman, S.R., 2014.** *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*. CRC Press.
- **Gliessman, S. (2018).** Defining Agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6), 599–600.

- **Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., van Es, H.M., Wolfe, D.W., Moebius-Clune, B.N., Thies, J.E. and Abawi, G.S. 2009.** Cornell Soil Health Assessment Training Manual, Edition 2.0, Cornell University, Geneva, NY.

- **HLPE. 2019.** Enfoques agroecológicos y otros enfoques innovadores en favor de la sostenibilidad de la agricultura y los sistemas alimentarios que mejoran la seguridad alimentaria y la nutrición. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial, Roma, 2019. www.fao.org/cfs/cfs-hlpe/es.

- **Holt-Giménez, E. & Altieri, Miguel. 2013.** Agroecology, Food Sovereignty, and the New Green Revolution, *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37:1, 90-102, DOI: 10.1080/10440046.2012.716388).

- **Hubanks Hannah L., Deenik Jonathan L. and Crow Susan E. 2018.** Getting the Dirt on Soil Health and Management, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier. 8-Feb-18

- **IPBES. 2018.** The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Pag. 22. Key messages. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744 pages.

- **Janzen, H. H. 200.** Soil carbon: A measure of ecosystem response in a changing world? *Canadian Journal of Soil Science*, 85(Special Issue), 467–480. doi:10.4141/s04-081

- **Kinyangi, J. 2007.** Soil health and soil quality: A review. Disponible en: <http://www.cornell.edu.org>.

- **Kleber, M., & Lehmann, J. 2019.** Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Journal of Environment Quality*, 48(2), 207.

- **Kleja, D., Nakata, S., Persson, I., & Gustafsson, J. P. 2016.** Silver(I) Binding Properties of Organic Soil Materials Are Different from Those of Isolated Humic Substances. *Environmental Science & Technology*, 50(14), 7453–7460.

- **Kumar. 2014.** Evaluation of Vermicompost Maturity Using Scanning Electron Microscopy and Paper Chromatography Analysis: BPC and SEM techniques proved useful tools to monitor the maturity of vermicompost during the composting process.
- **Labrador J. 2008.** Manejo del Suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. Sociedad española de agricultura ecológica (SEAE). 59pgs.
- **Laishram J, Saxena KG, Maikhuri RK, and Rao KS 2012.** Soil quality and soil health: A review. International Journal of Ecology and Environmental Sciences 38(1): 19–37.
- **Lamar, Richard. 2018.** Re: How does NaOH extract humic substances from soil solution? Retrieved from: www.researchgate.net
- **Lal, R. 2004.** Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science, 304(5677), 1623–1627. doi:10.1126/science.1097396
- **Leff, Enrique. 2008.** Discursos sustentables. México: Siglo XXI Editores. 272 p.
- **Lima, A.C.R., Hoogmoed, W., Brussaard, L. 2008.** Soil quality assessment in rice production systems: establishing a minimum data set. J. Environ. Qual. 37, 623–630
- **Machado Vezzani, Fabianne. 2011.** Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Tesis de Doctorado en Ciencia del Suelo. Facultad de agronomía. Universidade Federal de Rio Grande do Sul.
- **Medina González, Hanoi; García Coronado, Jorge; Núñez Acosta Daniel. 2007.** El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 16, núm. 3, pp. 19-24 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba.
- **Melo David. 2020.** Qualidade de solos em agroecossistemas camponeses no território da borborema-Paraíba., 2020. Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Ciências Agrárias (Agroecologia) do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias (Agroecologia).

- **Melo, D. M. A.; Reis, E. F.; Coaracy, T. N.; Silva, W. A. O.; Araújo, A. E. 2019.** Cromatografia de Pfeiffer como indicadora agroecológica da qualidade do solo em agroecossistemas. Revista Craibeiras de Agroecologia, v. 4, n. 1, UFAL - Alagoas - AL.
- **Merril, C. R. 1986.** Acta Histochem. Cytochem. 19, 655–667
- **Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H.A. Shayler, M.B. McBride, K.S.M Kurtz, D.W. Wolfe, and G.S. Abawi. 2016.** Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY
- **Mol, G., & Keesstra, S. 2012.** Soil science in a changing world. Current Opinion in Environmental Sustainability, 4(5), 473–477. doi:10.1016/j.cosust.2012.10.013.
- **Nezomba, H., Mtambanengwe, F., Titttonell, P., & Mapfumo, P. 2017.** Practical assessment of soil degradation on smallholder farmers' fields in Zimbabwe: Integrating local knowledge and scientific diagnostic indicators. CATENA, 156, 216–227
- **NRCS, USDA. 2017.** Soil quality and soil health. June 20, 2017.
https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/co/home/?cid%4nracs144p2_063020.
- **NRCS, USDA.** Soil health assesment. En:
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/assessment/>
- **Olk, D. C., Bloom, P. R., Perdue, E. M., McKnight, D. M., Chen, Y., Farenhorst, A., Harir, M. 2019.** Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. Journal of Environment Quality, 48(2), 217.
- **Paul, E. A. 2016.** The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. Soil Biology and Biochemistry, 98, 109–126.
- **Rabilloud, T. 1990.** Mechanisms of protein silver staining in polyacrylamide gels: A 10-year synthesis. Electrophoresis, 11(10), 785–794.
- **Raghavendra, M. P. Sharma, A. Ramesh, A. Richa, S. D. Billore, and R. K. Verma 2020.** Cap 13: Soil Health Indicators: Methods and Applications. A. Rakshit et al. (eds.), Soil Analysis: Recent Trends and Applications. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020.

- **Roming, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F., McSweeney, K. 1995.** How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conserv.* 50, 229–236.
- **Sarandón, S. J., Zuluaga, M. S., Cieza, R., Janjetic, L., & Negrete, E. 2006.** Evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas de fincas en misiones, argentina, mediante el uso de indicadores. *Agroecología*, 1, 19-28. Recuperado a partir de:

<https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/14>
- **Sarandón, S., & Flores, C. 2014.** Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata. 467 pp.
- **Steffen, W, Richardson K, Rockström J, et al., 2015.** Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*. 2015; 347: 1259855
- **Sturz, A. V., & Christie, B. R. (2003).** Rationale for an holistic approach to soil quality and crop health. *Soil and Tillage Research*, 72(2), 105–106.
- **Pilon, Lucas; Joel Henrique Cardoso; Fabrício Sanches Medeiros. 2018.** Guía práctico de cromatografía de Pfeiffer. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2018. 16 p. (Documentos / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1516-8840 ; 455)
- **Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K., & Wagg, C. 2012.** Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 523–528.
- **Young, I. M. 2004.** Interactions and Self-Organization in the Soil-Microbe Complex. *Science*, 304(5677), 1634–1637. doi:10.1126/science.1097394.
- **Zinck, A. 2005.** Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. *Suelos, información y sociedad*, p. 9-19. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán. 282 p

